表示デバイスの時空間特性と生体影響に関する人間工学的研究

Ergonomic study on psycho-physiological effects and time-space characteristics of display devices

2011 年 3 月

金 相賢

表示デバイスの時空間特性と
生体影響に関する人間工学的研究

Ergonomic study on psycho-physiological effects and
time-space characteristics of display devices

2011 年 3 月

早稲田大学大学院国際情報通信研究科

国際情報通信学専攻 マルチメディアとヒューマンファクタ研究Ⅱ

金 相賢

目次

第１章　序論

１．１　本研究の背景

情報通信技術のグローバルな進化は、さまざまな技術の国際的相互作用をもたらし、新しいシステムや製品を次々と生み出している。特に視覚情報を表示するディスプレイやプロジェクターといった表示デバイスには、人と情報をつなぐ技術として高い注目が集まっており、技術を軸とする国際的な協力と競争が行われている。その結果、高性能と低コストの双方を実現する技術が研究・開発され、視覚情報に関する環境を、より高画質で臨場感のあるものに変えている。一例を挙げると、家庭では、プロジェクターや大型ディスプレイの普及と高性能な動画再生機器の登場により、映画館の高画質と高音質をリビングで楽しむホームシアターシステムが普及している。また、社会では、デジタルサイネージ（digital signage）の登場により、映像や音声、文字など、今まで複数のメディアに分けられて流通していた大量の情報を、大画面のディスプレイを利用し、効果的な場所とタイミングで伝達することが可能となった。

こうした背景には、表示デバイスの中でも、FPD（Flat Panel Display）関連技術の進歩が、大きくかかわっている。FPD は、LCD（Liquid Crystal Display）や PDP（Plasma Display Panel）の技術発展をもとに、大型化、高精細化が急速に進み、従来の表示デバイスに代わり、巨大なマーケットを形成している。社団法人電子情報技術産業協会（JEITA: Japan Electronics and Information Technology Industries Association）では 2008 年 4 月より、地上デジタルテレビ放送受信機器の日本国内出荷の調査において、CRT（Cathode Ray Tube）テレビに関する統計は廃止しており、2010 年現在は FPD のみを対象としている [1)]。今後デジタル放送の開始に伴い、ハイビジョン放送をライブ、または録画して楽しむ視聴者も加わり、FPD 市場はますます広がると予想される。

プロジェクターも、十分な投射距離を保てば効率よく大画面を表示できるという利便性により注目を浴びている。プロジェクターには FPD 技術が多く使用され、現在は LCD や LCOS（Liquid Crystal On Silicon）、DLP（Digital Light Processing）に表示された画像を光学系により拡大、投影する装置が一般的である。最近では、本体の小型化・軽量化とともに、輝度やコントラストおよび色純度など性能の向上により、オフィスや家庭などより多くの場面でプロジェクターの表示に接する機会が増加している。リアプロジェクションテレビ（rear projection TV）もプロジェクター技術を応用した表示デ

バイスで、一般的なプロジェクターがスクリーンの前面から投影するのに対し、背面から投影する特徴を持つ。リアプロジェクションテレビは、安価かつ軽量ということで、ホームシアター用表示デバイスとして広く使用されてきたが、昨今では、大型パネルを用いたFPDの普及により厳しい競争にさらされている。

近年、FPD およびプロジェクターの次世代技術として、立体映像表示技術の研究開発がさまざまなアプローチから進められている。立体映像表示は両眼に視差のついた映像を表示し、左右映像をいくつの方法で分離することで実現されるが、これには特殊なメガネを用いる技術と、メガネを使わずにバリアやレンチキュラレンズなどを用いる技術に大別できる [2)3)]。前者は、同時に多人数が立体視可能なことや、現在の映像処理技術やデバイスを用いて比較的容易にコンテンツの制作や再生が実現可能であることで、次世代表示デバイスとして高い注目を集めている。メガネを用いた立体表示デバイスは、FPD の映像表示に液晶シャッタメガネを用い、順次に左右映像を表示する時間多重化による表示方式 [4)]と、液晶パネルの表面にパターニング位相差板を貼り合わせ、偏光フィルタメガネを用いることで、同一空間内の左右映像を両眼に表示する空間多重化による表示方式に大きく分かれる [5)6)]。これら 2 つの方式は、映画産業の立体コンテンツ制作も後押しとなり、3D テレビや立体プロジェクターなど家庭およびオフィスでの立体表示デバイスとして商品化に至っている [7)-12)]。

表示デバイスの進化に伴って大画面および立体表示による高臨場感や迫力のある映像が得られ、情報の表示効率が上昇する一方、表示効率と生体安全性のトレードオフになることもある。ここで映像の生体安全性とは、テレビ、ビデオ、ビデオゲーム、インターネットなど映像提示媒体を通して表示される動画像により生じ得る、健康面での生体影響から多くの人々、とりわけ影響を受けやすい人を守ることを目的とする概念である [13)14)]。対象となる生体影響は、光感受性発作、映像酔い、立体映像等による視覚疲労がある。光過敏性発作とは、光の点滅や明暗の縞模様などの視覚刺激による、発作といった異常反応の症状である [15)]。代表的な事例としては、1997 年に日本で、あるアニメ番組の多くの視聴者が光感受性によるとみられる症状を訴え、病院で手当てを受けたという事例が挙げられる [16)]。これをきっかけに、日本では 1998 年に NHK と日本民間放送連盟より「アニメーションなどの映像手法に関するガイドライン」が制定され、放送用の映像が視聴者に健康被害を及ぼさないように配慮されるようになった [17)]。映像酔いとは、テレビ画面やスクリーン上の映像が不規則的に激しく揺れるのを見続けると、

軽く酔ったような感覚に陥る状態である[18]。2003年には、松江市の中学校の体育館で行われていた総合学習授業の中で、画面の不規則な揺れや頻繁な画面の切り替えが含まれたビデオ映像を見ていた１年生285人のうち、36人がめまいや吐き気、頭痛などの症状を訴えて病院に運ばれたという事例がある[19]。立体映像に起因するよる生体への影響には、両眼視差による視覚系の不整合、視野闘争、クロストークによる眼精疲労があげられる。眼精疲労とは、正常ではあり得ない視覚的刺激から視覚情報処理に破綻をきたしているにもかかわらず、見ることに努力を傾注したために視覚システムに過度な負担を強いた状態を指す[20]。特に、立体表示デバイスには、水晶体の調節と輻湊が一致しないという視覚系の不整合や左右の表示デバイスの特性差に起因する問題が生じるが[21]、こういた問題は解決されないまま、普及に至っているのが現状である。独立行政法人国民生活センターによれば、2010年に公開された3D映画を鑑賞して気分が悪くなったという相談が多数寄せられている[22]。

こうした表示デバイスによる生体安全性への影響を軽減させる目的で、ガイドラインの作成と規格化にかかわる国際的な動きが活発化している。2005年には、国際電気通信連合（International Telecommunication Union、以下ITU）より、テレビ映像による光感受性発作を抑えるための指針（ITU-R BT. 1702）が発行された[23]。同年、国際標準化機構（International Organization for Standardization、以下ISO）においても、映像の生体安全性に関する国際ワークショップ合意文章（ISO IWA3:2005）が発行された[24]。2006年には、国際照明委員会（International Commission on Illumination、CIE）に設置された5か国の参加する技術委員会（TC1-67）が、映像の生体安全性に関する３つの生体影響に関する科学的知見を技術報告書としてまとめている[25]。また、ISOの専門委員会にも６ヵ国が参加するスタディーグループ（ISO/TC/ 159/SC 4/SG on Image Safety）が設置され、映像の生体安全性に関するガイドラインの国際標準化を進めている[26]。

こうした取り組みの中、ISO-TC159国内対策委員会が、裸眼立体ディスプレイの性能評価方法を提案している。この方法は、立体映像の視域を疲労の受けない立体視域QBVS（Qualified Binocular Viewing Space）と良好な立体画質の立体視域QSVS（Qualified Stereoscopic Viewing Space）に分け、それぞれの広さを計測するものである[27]。国際電気標準会議（International Electrotechnical Commission）でも、FPDの一つとして立体ディスプレイを取り上げ、光学計測方法を中心に標準化を進めている。

また、社団法人電子情報技術産業協会と独立行政法人産業技術総合研究所が、3D コンソーシアムと共同で 3DC 安全ガイドラインおよび 3D 文献抄録集を公開している [28]。これらはいずれも、技術的な進歩と視聴環境の変化と影響を研究し、生体への悪影響を未然に防ぎ、安全かつ快適に新技術を利用するために不可欠な活動であるといえる。

しかし、国際標準化には時間がかかるため、日々進化する技術に追いつかないこともある。また、技術開発の成果は開発企業の知的財産であり、企業価値の最大化を追求する上での重要な要素であるため、安全性に関する充分な検討が行われぬままに、商品化されることもある。さらに、使用者側が、メーカー側の技術開発時に想定した使用方法や視聴環境と異なる使い方を行うことで影響を受けることもある。本研究で対象とする、カラーブレイクアップ（Color Breakup、以下 CBU）は、色順次表示方式という新たな表示デバイスに起因する現象で、技術が普及した後で発生条件や生体影響に関する検討が行われた事例である。また、立体表示デバイスに関しても、技術開発に重点が置かれており、表示方式に起因する生体影響に関する情報は明らかになっていない部分が多い。これらの表示デバイスにおける生体影響の要因を明らかにするには、メーカー側の製品に対する評価だけでなく、使用者の体験（User Experience）に基づいた評価実験を重ねていくことが望まれる。

本研究では、これらの知見を踏まえた上で、表示デバイスにおける新たな技術として、プロジェクターシステムにおける色順次表示方式や立体表示デバイスにおける時・空間多重方式に起因するアーチファクト（Artifact）を対象に評価実験を実施する。ここでアーチファクトとは、表示デバイスが本来設計された映像情報以外に表示する視覚情報と定義する。当該分野では、研究手法として、生体計測を中心に実施する人間工学的アプローチが用いられる。人間工学とは、システムにおける人間と他の要素とのインタラクションを理解するための科学的学問であり、人間の安寧とシステムの総合的性能との最適化を図るため、理論・原則・データ・設計方法を有効活用する独立した専門領域として定義されている [29]。本研究では、表示デバイスを対象に、使用者の快適性や安全性など人間の要求事項を考慮し、人にやさしく、使いやすい技術を実現するための物理的、心理的、生理的指標を用い、人間工学的評価を行われる。また、表示デバイスの評価において、生体に与えるネガティブな影響をどう軽減するかだけでなく、次世代技術によるポジティブな効果をいかに増進させるかも重点課題として考えられる。そのためには、表示デバイスの時空間特性が生体へ与える影響を人間工学的に評価し、それらの

データを研究者および開発者にフィードバックすることが重要である。次世代技術を安全かつ快適に利用するためには、生体影響に関する情報を共有し、より的確かつ有効な評価指標と評価方法を確立する必要がある。また、得られた情報を、ガイドライン作成や技術改善に活用することにより、誰もが安全かつ快適に新技術を楽しむことが可能となる。

１．２　本研究の目的

本研究の目的は、表示デバイスの安全かつ快適な使用環境を実現するため、表示デバイスの時空間特性を理解するとともに、その表現特性のうち好ましくない生体影響について人間工学的に評価するところにある。ここでは特に、表示デバイスの時空間特性に起因するアーチファクトが引き起こす生体影響について調査する。

具体的には、プロジェクターシステムにおける色順次表示方式に起因するアーチファクトと立体表示デバイスにおけるいくつかのアーチファクトについて、その特性や時間経過による視覚刺激の変化が生体に与える影響を検討する。評価には心理および生理指標を用いることで、表示デバイスに対する定量的な評価指標と方法を確立する。具体的には、心理指標として眼精疲労の自覚症状調査やインタビュー調査を行うことで、表示デバイスの特徴に対する心理的反応を測定し、定量化する。また、生理指標には、眼球運動、精神的ストレス、瞬目回数の変化を指標として用いる。

前節にて、表示デバイスの技術進歩に伴い、家庭でも、高臨場感や迫力のある映像が得られる一方で、視覚負担など生体への影響が懸念されていることを述べた。表示デバイスの方式に起因する影響を研究かつ評価を行うのは、生体への悪影響を未然に防ぐために重要である。そこで、本研究では、技術開発が進んでいる表示デバイスの中、色順次表示方式を採用する表示デバイスを対象に、観察時に知覚されるアーチファクトが誘引する生体影響を調べた。また、最近注目を集めている、立体表示デバイスを対象に、表示方式に起因するアーチファクトの特性や、時間経過による視覚刺激の変化が、生体に与える影響を検討した。

第 2 章では、色順次表示方式を採用したプロジェクターシステムの CBU 現象を対象に、その発生条件を明らかにした。具体的には、評価基準に眼精疲労の自覚症状調査およびインタビュー調査といった主観評価を用い、人間工学的観点から観察者に与える生

体影響を調査する。

第 3 章では、前章で得られた主観評価実験の結果に加え、生理指標で評価することにより、より明確に観察者に与える生体影響を調査する。指標には、眼球運動中の停留データの分析や精神的ストレスと関連がある唾液中の蛋白質の測定を用いた。

第 4 章では、立体表示デバイスにおけるアーチファクトの発生を確認し、これが与える生体影響について検討する。立体表示デバイスの多くは、表示効率や技術的制約により、両眼視差を持つ左右の映像を時間的もしくは空間的に多重化して表示している。こうした多重化による表示方法では、表示デバイスの時空間特性によりアーチファクトが生じる。そこで、立体表示デバイスごとにアーチファクトの発生条件とその種別を明確し、さらにそれぞれのアーチファクトが生体に与える影響を明らかにすることで、立体表示デバイスに関する基礎的な知見を得ることを目指した。

第 5 章では、前章で得られた立体表示デバイスの基礎的知見を踏まえ、アーチファクトからの影響が少ない環境下で、立体映像観察時の、時間経過に伴う視覚的な負担や立体感の変化に関する基礎的な検討を行った。視差角の定量化を図り、時間経過に伴う視覚的な負担を変化することで、眼精疲労や立体感の変化に関する影響を調べた。また、生理指標として、瞬目の測定を行い、より明確に、観察者の与える生体影響を検討した。

以上、4 つの研究課題を遂行することにより、人間の生体特性を考慮した、表示デバイスの安全かつ快適な視環境にかかわる、基礎的な知見を得ることを目指した。

１．３　本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。図 1.1 に本研究のロードマップを示した。

第 1 章 序論

本研究の背景、目的、本論文の構成について述べた。

第 2 章 色順次表示方式における生体影響の主観評価

本論文で対象とする、色順次表示方式に起因する CBU を定義し、心理指標を用い、眼精疲労の特徴的自覚症状について検討を行った。

第 3 章　色順次表示方式における生体影響の客観評価

第 2 章の知見をもとに、生理指標として、眼球運動および精神的ストレスの変化を測定し、色順次表示方式に起因する CBU が、生体に与える影響について検討を行った。

第 4 章　立体表示方式における生体影響の主観評価

立体表示デバイスの時空間特性に基づき、表示方式に起因するアーチファクトの発生条件を明確にし、眼精疲労や立体感の見え方を調べることにより、生体に与える影響について検討を行った。

第 5 章　立体表示方式における生体影響の客観評価

第 4 章の知見をもとに、立体像の再生位置と、時間経過に伴う視覚的な負担や立体感の変化が、生体に与える影響について検討を行った。

第 6 章　結論

本研究全体の総括を行い、今後の課題について述べた。

表示デバイスをめぐる環境変化

■ ディスプレイマーケットの成熟
・グローバルマーケット展開
・低価格化競争の本格化
・低消費電力など環境配慮重視

■ 新たなデバイス技術の実用化
・情報通信技術の導入
・デジタルサイネージ
・立体ディスプレイ

高性能と低コストを両方実現可能な表示技術の研究・開発

色彩情報
両眼視差情報

時間多重化表示
空間多重化表示

フルカラー再現
立体映像再現

色順次表示デバイス
立体表示デバイス

表示デバイスの時空間特性と視環境に起因する生体影響

■ 色順次表示によるアーチファクトの発生
・カラーブレイクアップ (CBU)
・特定の眼球運動の際に知覚
・コントラストの強い刺激に誘発
・色順次表示周波数による影響

■ 表示方式に起因するアーチファクトの発生
・フリッカ
・偽視差
・ファントムアレイ
・視野闘争
・解像度低下

■ 視差情報の継時的変化

心理・生理指標を用いた人間工学的評価

第２章
色順次表示方式における生体影響の主観評価
・心理指標－眼精疲労の特徴的自覚症状

第３章
色順次表示方式における生体影響の客観評価
・生理指標－眼球運動や精神的ストレス

第４章
立体表示方式における生体影響の主観評価
・アーチファクトによる眼精疲労及び立体感の変化

第５章
立体表示方式における生体影響の客観評価
・視差変化による眼精疲労及び立体感の変化

第６章　結論

表示デバイスの時空間特性からみた安全かつ快適な視聴環境に関する知見

図 1.1　本研究の概要

参考文献

1) 社団法人電子情報技術産業協会：2010 年 9 月地上デジタルテレビ放送受信機器国内出荷実績，http://www.jeita.or.jp/japanese/stat/digital/2010/10.html (2010)

2) S. Pastoor, M. Wöpking："3-D displays: A review of current technologies", Displays, 17, pp. 100-110 (1997)

3) 河合隆史，盛川浩志，太田啓路，阿部信明："3D 立体映像表現の基礎-基本原理から制作技術まで"，オーム社，pp. 26 (2010)

4) 磯野春雄，安田稔："時分割立体視の成立条件"，テレビジョン学会誌，41(6)，pp. 549-555 (1987)

5) 松廣憲治，河野通之，高橋通："マイクロポールによる 3D-LCD システム"，電子情報通信学会技術研究報告，100(437)，pp. 43-46 (2000)

6) 株式会社有沢製作所：http://www.arisawa.co.jp/en/product/3d.html (2010)

7) パナソニック株式会社：http://3d.panasonic.net (2010)

8) ソニー株式会社：http://www.sony.co.jp/united/3D/ (2010)

9) シャープ株式会社：http://www.sharp.co.jp/3d-tech/ (2010)

10) HYUNDAI IT：http://www.hyundaiit.com/product/PrdProduct.jsp?pid=1 (2010)

11) LG Electronics：http://www.lg.com/ae/it-products/projectors/LG-3d-projector-CF3D.jsp (2010)

12) 株式会社ソリッドレイ研究所：http://www.solidray.co.jp/product/eizou/Sight3D.html (2010)

13) 氏家弘裕："映像の生体安全性に関する ISO 国際ワークショップ報告"，VISION，17(2)，pp. 143-145 (2005)

14) 氏家弘裕："人にやさしい映像の視聴環境づくりをめざす 映像の生体安全性に関する国際標準(ISO IWA3: 2005)発行"，産総研 TODAY，6(3)，pp. 28-29 (2006)

15) Graham F. A. Harding, Peter M. Jeavons："Photosensitive Epilepsy (New Edition)", Cambridge University Press, pp. viii (1994)

16) 総務省："コンテンツの生体への影響に関する調査・研究報告書"，pp. 9 (2004)

17) 日本放送協会，社団法人日本民間放送連盟：アニメーション等の映像手法に関するガイドライン，http://www3.nhk.or.jp/pr/keiei/otherpress/060831-002.html (2010)

18) 氏家弘裕：“映像酔い”，映像情報メディア学会誌，61(8)，pp．1122-1124 (2007)

19) 松田隆夫，大中悠起子：“「映像酔い」の自覚的評価とその誘発要因”，立命館人間科学研究，9，pp．97-106 (2005)

20) 岩崎常人：“眼精疲労の測定方法と評価-CFF と AA-1-”，眼科，51(4)，pp．387-395 (2009)

21) K. Ukai, P. Howarth : “Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations”, Displays, 29(2), pp. 106-116 (2008)

22) 青山陽子：“3D に関する消費生活相談の概要”，3D 映像，24(4)，pp．2-4 (2010)

23) International Telecommunication Union : Recommendation ITU-R BT. 1702, Guidance for the reduction of photosensitive epileptic seizures caused by television (2005)

24) International Organization for Standardization : IWA3, Image safety - Reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences (2005)

25) International Commission on Illumination :
http://div1.cie.co.at/?i_ca_id=549&pubid=237 (2010)

26) 氏家弘裕：“映像の生体安全性に関する研究開発と国際標準化”，光技術コンタクト，47(3)，pp．116-122 (2009)

27) 結城昭正：“2 眼立体ディスプレイにおける画質への光学特性の影響-3D クロストーク両眼輝度差の影響”，映像情報メディア学会技術報告，33(16)，pp．25-30 (2009)

28) 3D コンソーシアム：「3DC 安全ガイドライン」ダウンロードページ WEB サイト，
http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt_wg_rep/guide_index.html (2010)

29) 一般社団法人日本人間工学会：http://www.ergonomics.jp/outline.html (2010)

第２章　色順次表示方式における生体影響の主観評価

２．１　本章の目的

本章の目的は、プロジェクターシステムにおいて、色順次表示方式（Color Sequential）における生体影響について検討するところにある。色順次表示方式とは、RGB などの各色を高速に順次表示することにより、色を表現する時間多重型方式の総称である。時間順次を行うため、他方式よりも本体を小型および軽量化できるため、多くの視覚デバイスに採用されている。その一方で、時間順次による色再現を行うため、観察時の瞬目や、急速な眼球運動の際、CBU という、一種のアーチファクトが知覚されるが、これが生体に与える影響に関しては未知の点が多い。そこで、本章ではまず主観評価を用い、人間工学的観点から観察者に与える生体影響を調査する。

色順次表示方式プロジェクターに関する研究では、仕組みや技術改善にかかわる研究[1)-3)]が主であり、アーチファクト発生やその影響に関する研究は少ない。また、実際の観察状況を想定した場合に起こり得る、生体への影響や、CBU が起こらないプロジェクターとの比較に関する研究も少ないのが現状である。そこで、実際のプロジェクター使用環境を想定し、CBU の有無条件間の違いが、生体に与える影響を明らかにすることを目的とし、二つの評価実験を行った。評価実験 1 では、CBU が顕著におこる単純刺激を対象に、主観的な疲労感と相関する指標を用いることで、特徴的な眼精疲労の自覚症状の特定を行った。評価実験 2 では、プロジェクターの実際の使用場面を考慮し、映画やスライド刺激を対象に、評価実験 1 で特定された自覚症状を中心に、生体に与える影響を調べた。

２．２　色順次表示方式

２．２．１　色順次表示方式とは

プロジェクターの投影方式には、LCD、DLP、CRT がある。さらにその中で、単板式 LCD プロジェクター、3 板式 LCD プロジェクター、単板式 DLP プロジェクター、3 板式 DLP プロジェクターがあり、それぞれ利用場面や用途によって使い分けられている。

現在ある 5 種類の投影方式の中で、技術的に最も新しいものが、単板式 DLP プロジ

ェクターである。単板式 DLP プロジェクターは、DMD（Digital Micromirror Device）に光を反射して映像を映し出す。DMD は、独立して動く 48 万～131 万の小さな鏡が集まって構成されており、鏡の個々が ±12 度（オン・オフ）に傾くことが可能である。光源からの光が、－12 度の鏡に反射される場合光吸収板に吸収され黒となり、＋12 度の鏡に反射される場合、投影レンズを通ってスクリーンに投影される映像となる [4)]。DLP プロジェクターは DMD の数によって 3 板式と単板式に分類される。

3 板式 DLP プロジェクターは、RGB に相当する 3 枚の DMD を用いることで、高いコントラストと色再現を向上しており、視覚刺激装置や映画館での上映に使用されている。しかしながら、3 板式 DLP プロジェクターは、高価であり、サイズが大きいことから、家庭用およびオフィスで使用するプロジェクターでは 1 枚の DMD を用いる、単板式 DLP プロジェクターが使用される。

単板式 DLP プロジェクターは、光源からの光を、カラーホイールフィルタ（Color Wheel Filter）を通して DMD に当て、時間順次に表示することでカラー表示を行う、色順次表示方式を採用している。図 2.1 に色順次表示方式を用いるプロジェクターにおける、カラーホイールフィルタの種類や、それを用いてカラー表示を行う投影方式の主な仕組みを表す。

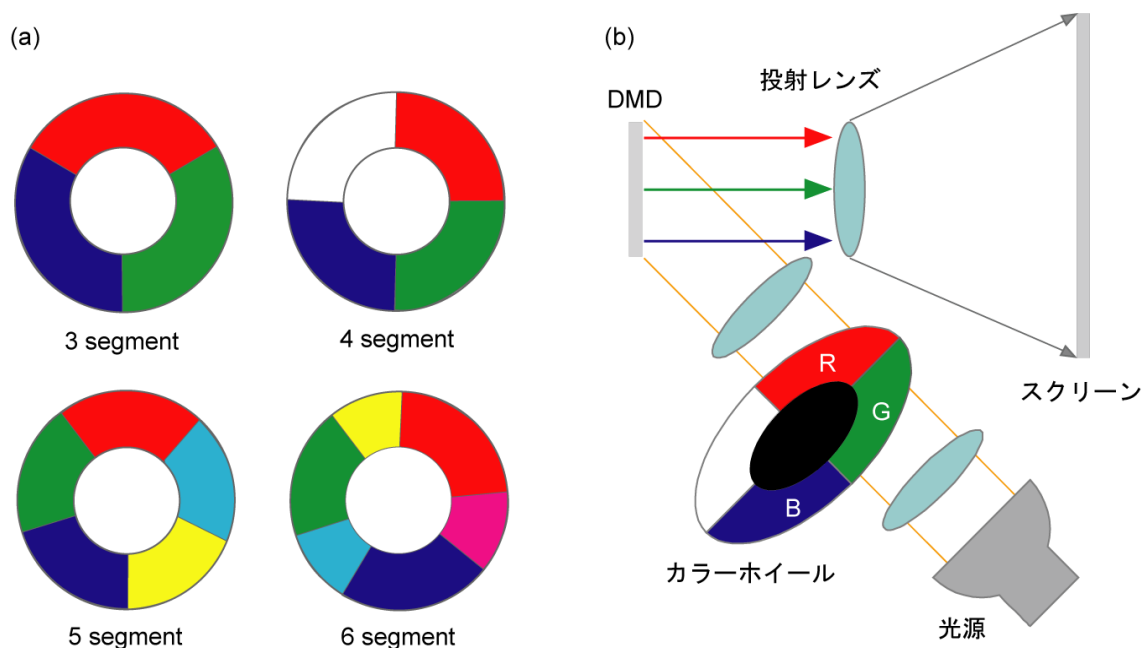



図 2.1　（a）単板式 DLP プロジェクターのカラーホイール、（b）投影方式

DMD は、送られてきた信号に従い、毎秒数千回といった高い速度でミラーを±12 度にオン・オフを繰り返し、色を写しだす。例えば、赤色を投影したい場合にはカラーホイールの赤フィルタを通った光が DMD にあたっている瞬間だけ、ミラーがオンの状態となり、スクリーン上に赤が表示される [5]。カラーホイールは、色再現性において重要な役割を担っており、RGB で構成された 3 セグメントをはじめに、白（W）を加えた 4 セグメント、イエロー（Y）、シアン（C）の色を加えた 5 セグメント、さらにマゼンダ（M）の色を加えた 6 セグメントなど、多様なカラーホイールが存在する。これらの、基本的な駆動原理は同じであるが、カラーホイール形やエンジン部の性能により、映像の見え方や色再現が異なる [6)7]。カラーホイールの回転速度は、一般的に 1/60 秒ごとに RGB などの色構成が入れ替わることを 1 倍速とした、相対的な色の切り替え速度で表示されており、市販されている多くは 2～3 倍速のプロジェクターである。このように、1 枚板のカラーホイールによって色を投射することで、本体の小型化、軽量化になり、高輝度、高コントラストの映像が実現可能となった。

２．２．２　カラーブレイクアップの先行研究

CBU は、継時混色された映像に対して、眼球運動を伴って観察するとき、静止画であっても各色フィールドによる像が網膜上で移動するため、各色の分割像が知覚されると言われる。眼球運動に起因する CBU の知覚イメージを図 2.2 に示す。

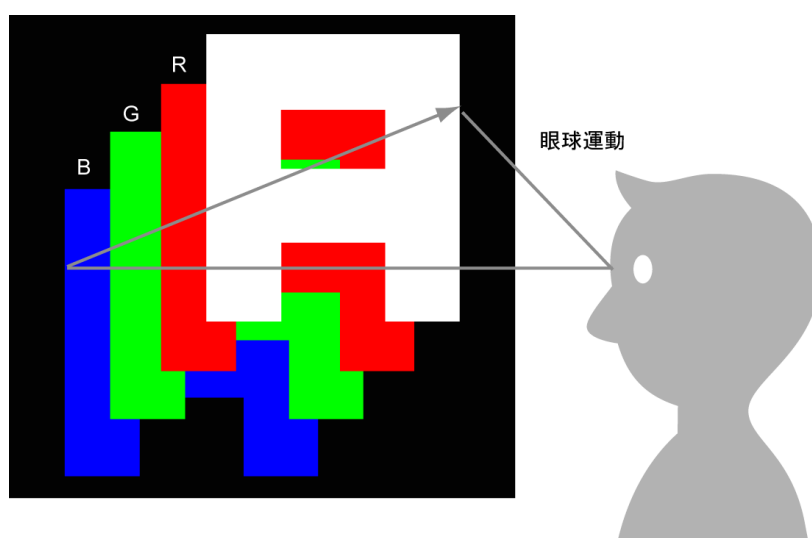



図 2.2　CBU の知覚イメージ

森らは、CBU の発生機構について調べている[8]。眼球運動を伴わない固視状態でも各色フィールドが分割された像を網膜上に与えることができる装置を試作し、網膜速度に対する CBU 発生の閾値となるフレーム周波数の関係を求めた。その結果、フレーム周波数と網膜速度は、非線形であり、プロジェクターの周波数をむやみに上げる必要はないと報告した。また、固視状態と、眼球運動が行われているときでは、CBU の発生条件が異なる可能性を示唆している。

和田らは、固視状態での CBU を視認できるシミュレータを製作し、CBU の発生メカニズムの解明を試みた[9]。その結果、CBU は、衝動性眼球運動（Saccadic Eye movement、Saccade、以下サッケード）によって知覚され、随従運動やその他の眼球運動では起こらない可能性を示唆した。サッケードとは、動く視対象を観察する際に、停留と移動を断続的かつ瞬間的に行われる眼球運動である。それを受け、実際の使用環境に近い条件のプロジェクションディスプレイシミュレータを製作し、サッケードと CBU を誘導する臨界のフレーム周波数（CBU-CFF）の検討を行っている。CFF（Critical Flicker Frequency）とは、フリッカの知覚されない臨界融合周波数を意味する。その結果、視標となる呈示画像が小さくなるほど、またサッケードが速くなるほど、CBU-CFF は高くなった。そして、CBU を防止するためには、フレーム周波数を少なくとも 500Hz 以上にする必要性を示唆した。

養祖らは CBU が発生する刺激を対象にサッケードが起こる途中、早いスピードで点滅するフラッシュを呈示し、CBU の知覚位置を測定した[10]。実験の結果、CBU はサッケード中の網膜像の軌跡と一致せず、動いた眼球運動の幅よりも狭い範囲で観測された。これらの結果は、ファントムアレイ（Phantom Array）の知覚と類似しており、視野の安定性（Visual Stability）に影響を与えることが示唆された。ファントムアレイとは、サッケードの際に、高速に点滅するフリッカ視標を呈示すると、サッケード振幅半分の線列が知覚される現象をいう。サッケードを含む眼球運動には、サッケード抑制（Saccadic Suppression）という感度低下現象が発生し、サッケード中の不鮮明な網膜像を知覚しにくくして視野の安定性を保っている。CBU の知覚はサッケード抑制が弱くなり、視野の安定性が保たないことによって発生する可能性が示唆された。

これらの実験は CBU の発生条件およびメカニズムの解明が主な目的である。それに対し、尾形らは先天眼振を有する者を対象に CBU が身体に与える影響を評価した[11]。眼振とは規則的に繰り返し往復する眼球運動のことをいい、健常者でも条件によって起

こる眼球運動であるが、病的な眼振は先天的な眼振と後天的な眼振に分かれ、一般の眼振に比べ、異常で随意でない動きを見せる。実験では、先天眼振を有する者を対象に、さまざまな機種のプロジェクターによる映像を見てもらい、そのときの体調と眼精疲労による症状を自覚的に測定することを試みた。その結果、眼精疲労の自覚症状の悪化はLCD プロジェクターでもっとも少なく、DLP プロジェクター（2 倍速）でもっとも強い結果を出し、眼振を有する者が色順次表示方式によるディスプレイを見る場合には、短時間で強い疲労を感じることが指摘されている。

このように、色順次表示方式を用いることで表示効率の向上につながる一方、観察時の瞬目や急速な眼球運動の際、カラーホイールに使用された色が分離して視認されるCBU が知覚される。

２．３　色順次表示方式と眼精疲労の自覚症状項目の抽出

２．３．１　本実験の目的

本実験では、主観評価に基づき、CBU を対象として、色順次表示方式のプロジェクターによる刺激観察時の、視覚負担について検討、評価することを目的とした。具体的には、CBU が顕著におこる単純刺激を呈示し、眼精疲労の自覚症状項目で構成された主観評価から、特徴的な症状を抽出した。

２．３．２　実験方法

（１）実験環境

実験環境は、視距離を 250cm で 100 インチスクリーンを観察するように設定した。また、スクリーンに対して中央の位置に配置した椅子に被験者を着席させ、被験者の眼の高さが、ほぼスクリーンの中心位置となるよう調整した。その際のスクリーンに対する水平視野角は、44.2 度であった。

実験の表示デバイスは、ホームシアター用途でよく使用されると思われるプロジェクターとして、単板式 DLP プロジェクター（以下、単板式 DLP）、3 板式 LCD プロジェクター（以下、3 板式 LCD）を対象とした。また、DLP と LCD といった、カラーホイール以外の要因からの影響を考慮すべく、単板式 DLP からカラーホイールを除いた色切り替えのないプロジェクター（以下、モノクロ DLP）を実験対象に加えた。なお、

各プロジェクターで白色を呈示し、スクリーン中央での照度を測定したところ、モノクロ DLP が 570 lx、単板式 DLP が 245 lx、3 板式 LCD が 410 lx であった。図 2.3 に実験環境を示す。

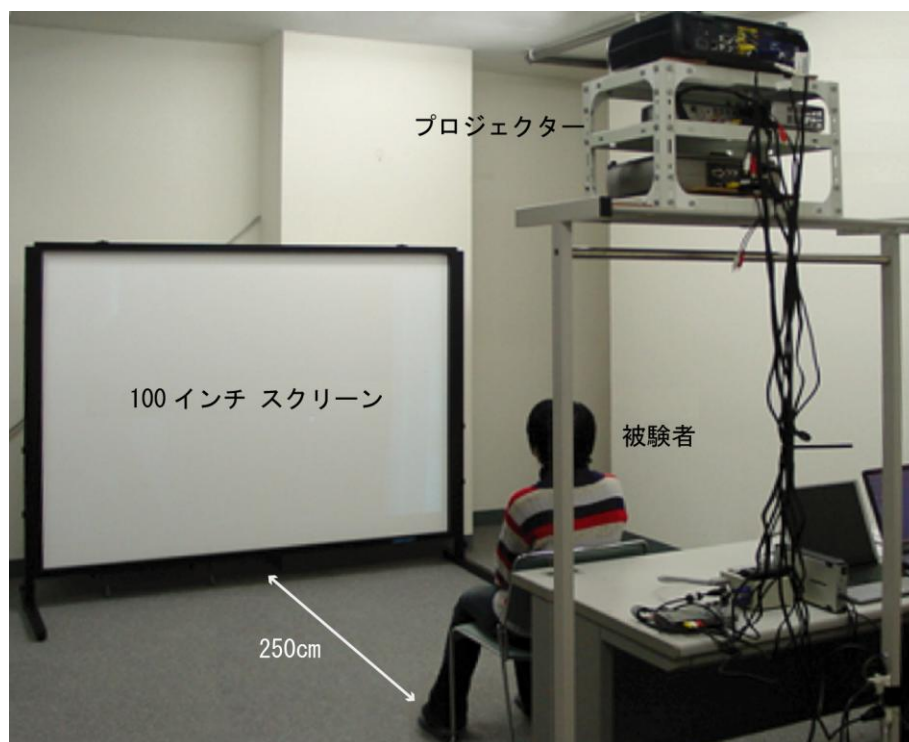



図 2.3　実験環境

（２）実験条件

実験条件は、異なる投影方式のプロジェクターからなる 3 条件を設定した。プロジェクターには、モノクロ DLP、色順次表示方式を用いた単板式 DLP プロジェクター、3 板式 LCD プロジェクターの 3 種類を用いた。表 2.1 に実験条件を示す。

表 2.1　実験条件

条件	表示デバイス
1	モノクロ DLP
2	単板式 DLP
3	3 板式 LCD

呈示刺激の詳細としては、黒い背景に水平視角 1 度の正方形、正円形、正三角形の視標を、画面内の左右の位置に、5 秒間隔でランダムに呈示し、被験者にはその図形を注視させた。つまり、被験者に、5 秒ごとに水平方向の眼球運動を行わせた（図 2.4）。そして、正円形が呈示されたときには、手元のマウスをクリックさせることで選択反応時間を測定し、被験者が確実に刺激を観察していることを確認した。なお、垂直に並んだ 2 本の線の幅は、水平視角がそれぞれ 0.5 度となるように作成した。呈示刺激は、3 条件すべてにおいて同一のものを使用し、刺激呈示時間は 10 分間とした。

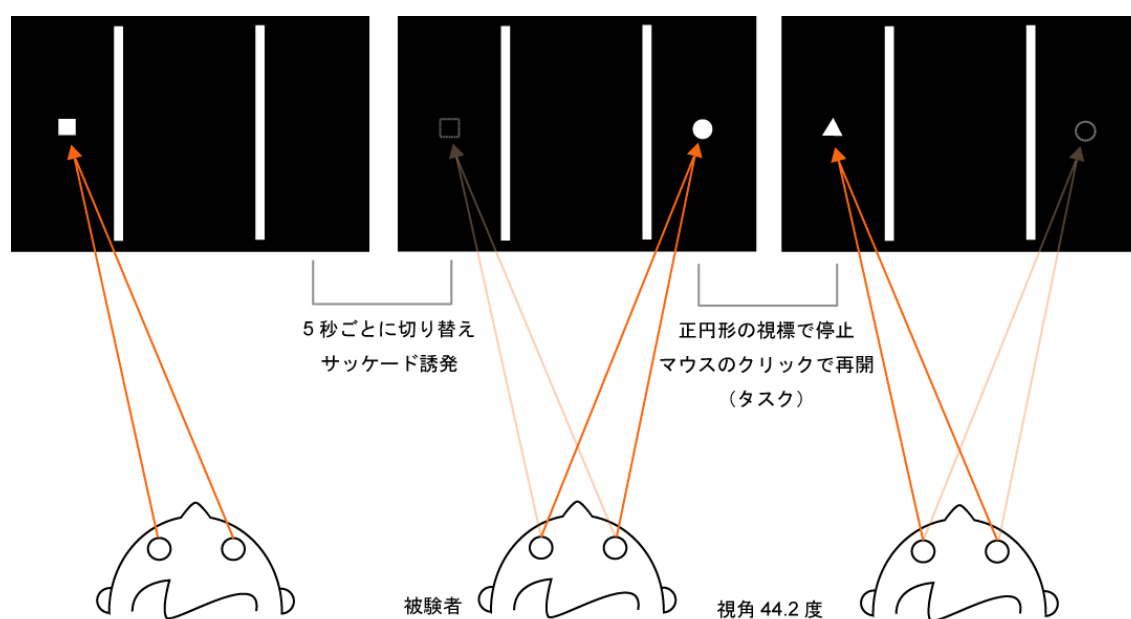



図 2.4　呈示刺激

（３）実験手順および被験者

刺激呈示時間は 10 分間とし、その前後に、眼精疲労の自覚症状調査を 5 件法で行った。評価指標として、鈴村による 37 項目の眼精疲労の自覚症状調査票を用いることとした [12)]。各条件の観察後および実験終了後には、見え方や眼の状態などに関するインタビュー回答を求めた。

以下に実験手順を示す。

（1）色覚調査

（2）刺激呈示前の眼精疲労の自覚症状調査（観察前）

（3）いずれかの条件による刺激呈示（10 分間）

（4）刺激呈示後の眼精疲労の自覚症状調査（観察直後）

（5）休憩（15 分間）

※休憩中には、半構造的なインタビュー調査を併せて行った。

（6）休憩後の眼精疲労の自覚症状調査（観察 15 分後）

なお、被験者は、心身ともに健康な大学院生 8 例であり、被験者ごとの実験条件はランダムになるように設定した。被験者数は、予備実験の結果および映像に起因する不快感を調査した先行研究 [13)]を参考にし、同類の指標を使用する実験を繰り返し行うことで分析データを蓄積した。

２．３．３　結果と考察

眼精疲労の自覚症状の調査結果では、刺激観察後の変化を明確化するため、刺激観察前の測定値を基準とした変化率に変換して検討した。具体的には比較時点の値である刺激観察後の値から基準時点の値である刺激観察前の値を引き、それを観察前の値で割った変化率の平均を求めて項目別に解析を行った。変化率への換算は、自覚症状調査の解析によく用いられる操作で、刺激呈示後の被験者の眼精疲労度が高いほど変化率も大きくなる。表 2.2 に、眼精疲労に関する自覚症状調査の 37 項目の結果として、変化率の平均を示した。

表 2.2　眼精疲労の自覚症状の結果（変化率）

No.	37 項目	条件 1	条件 2	条件 3
1	眼が疲れる	0.36	1.05	0.71
2	充血する	0.29	0.14	0.43
3	めやにが出る	0.14	0.07	0.14
4	眼の圧迫感	0.24	0.90	0.33
5	眼の奥が痛い	0.48	0.90	0.26
6	眼が重い	0.43	0.76	0.50
7	眼の芯が痛い	0.40	0.19	0.57
8	眼を押さえると痛いが気持ちが良い	0.07	0.43	0.50

9	眼を開けているのが辛い	0.68	0.79	0.31
10	涙が出る	0.64	0.07	0.21
11	眼が熱い	0.00	0.07	0.21
12	眼が乾く	0.33	0.57	0.17
13	まぶしい	0.81	0.76	0.43
14	チカチカする	0.26	0.93	0.45
15	かゆい	0.07	0.00	0.36
16	まぶたがピクピクする	0.29	0.07	0.14
17	見つめているとぼける	0.36	0.29	0.57
18	チラチラする	0.29	0.43	0.79
19	二重に見える	0.29	-0.05	0.14
20	かすむ	0.29	0.00	0.14
21	焦点が合わない	0.36	0.19	0.36
22	頭痛がする（片頭痛、前頭部痛含む）	0.57	0.00	0.21
23	眉間の部分が痛い	0.43	0.14	0.57
24	頭が痛い	0.36	0.29	0.00
25	頭を振ると痛い	0.29	0.29	0.57
26	頭がぼんやりする	0.46	0.21	0.93
27	のぼせる	-0.05	0.14	0.43
28	見つめていると気持ち悪くなる	0.00	0.29	0.00
29	はきけがする	0.00	0.14	0.00
30	イライラする	0.10	0.07	0.07
31	フラフラする	-0.05	0.00	0.14
32	めまいがする	0.00	0.14	0.14
33	眠くなる	0.50	0.87	0.68
34	肩が凝る	0.52	0.21	0.76
35	胃の部分がだるい	0.05	0.00	0.07
36	全身がだるい	0.36	-0.05	0.19
37	眼がコロコロする	0.10	0.00	0.36

症状と条件間の変化について被験者内 2 要因分散分析を行ったところ、条件の主効果に有意傾向がみられた（F = 70.334、p < .1)。多重比較（Bonferroni 法）の結果、「眼の圧迫感」（F = 3.282、p < .1）と「チカチカする」（F = 2.924、p < .1）の項目に有意な傾向が表れ、単板式 DLP の方が影響を受けることがわかった。また、「眼の疲れる」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」の項目にも、単板式 DLP の方が他条件の変化率より高い変化が表れた（平均変化率 0.76 以上)。その他、「まぶしい」、「眼を開けているのがつらい」項目に関しても高い変化率が表れたが、モノクロ DLP との差が少なかったことから、CBU からではない、別の要因に起因するものと考えられる。また「チラチラする」、「頭がぼんやりする」、「肩が凝る」項目に対しては LCD プロジェクターの方に変化率が大きく、LCD プロジェクターに起因する眼精疲労の特徴として考えられた。なお、「眠くなる」項目において、各条件ともに変化率が大きいが、これの原因に関しては実験後のインタビューより、単純刺激による眠気が原因と思われる。これらの結果より、「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の 5 項目において、単板式 DLP を表示方式とした条件における、CBU による眼精疲労の特徴的な自覚症状として想定し、次の実験の指標として用いることでさらなる検討を行った。5 項目に関する自覚症状の結果を図 2.5 に示す。

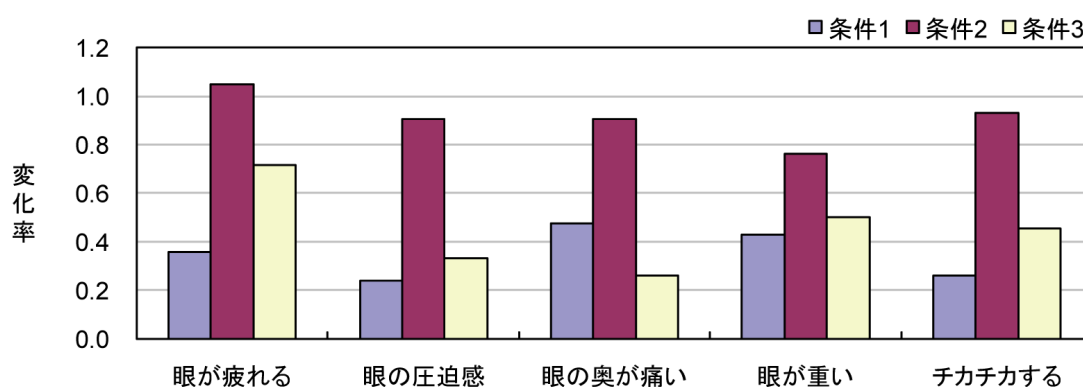



図 2.5　主な自覚症状の結果（5 項目）

そのほか、インタビューの調査結果、条件 1 に関しては、CBU は気にならなかったことや、まぶしさを訴える意見があった。それらに関しては、カラーフィルタを除去したことにより、プロジェクターの輝度が上昇したことが原因として考えられる。条件 2

に関しては、眼の動きおよび瞬きにより、CBU が知覚される意見が多かった。また、条件 3 に関しては、CBU は起きなかったが、残像のような波打つ縦線が見えるとの意見があった。

２．４　色順次表示方式と眼精疲労の自覚症状への影響

２．４．１　本実験の目的

本実験では、プロジェクターの実際の使用環境として、映画コンテンツ鑑賞用途およびプレゼンテーション用途を想定し、CBU が生体に与える影響について比較・検討を行うことを目的とした。

２．４．２　実験方法

（１）実験環境

実験環境としては、評価実験 1 と同様に、100 インチスクリーンを 250cm の視距離で観察するように設定した。プロジェクターは、単板式 DLP、モノクロ DLP、3 板式 LCD の 3 種類を用い、各プロジェクターは、画面全体に白色を呈示した時の、スクリーン中央での照度がほぼ同一となるように調整した。具体的には、単板式 DLP、およびモノクロ DLP の前面に、減光フィルタを付加したガラス板を配置することで、3 台のプロジェクターの照度を統一した。その際、ガラス板により反射した光が、プロジェクター内部および被験者の視野内に入らないように配慮した。測定の結果、単板式 DLP が 405 lx、モノクロ DLP が 405 lx、LCD が 410 lx であった。図 2.6 に、本実験で使用した 3 台のプロジェクターを示した。

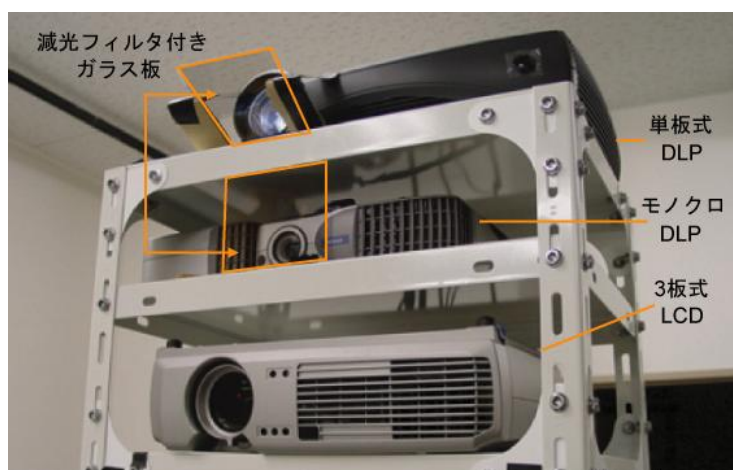



図 2.6　本実験に用いたプロジェクター

（２）実験条件

実験条件は、異なる投影方式の 3 種類のプロジェクターと 3 種類の呈示刺激からなる 2 要因の、計 7 条件の実験条件を設定した。プロジェクターには、モノクロ DLP、色順次表示方式を用いた単板式 DLP、3 板式 LCD の 3 種類を用いた。呈示刺激には、CBU が顕著に発生する映像パターンの、グレースケール版とフルカラー版の 2 種類、および、黒色の背景に白色の文字を配置したスライドが、ランダムな順序で呈示される刺激を用いた。実験条件を、表 2.3 に示す。

表 2.3　実験条件

呈示刺激と 表示デバイス	グレースケールの 映像パターン	フルカラーの 映像パターン	スライド
単板式 DLP	条件 1	条件 4	条件 6
モノクロ DLP	条件 2		
3 板式 LCD	条件 3	条件 5	条件 7

条件 1 から 5 で使用した、映像パターン刺激については、大手レンタルビデオ店の 2003 年 12 月期における人気映画タイトル 10 本のなかから、CBU が顕著に起こる要因として高輝度の映像が含まれるシーンを抽出し、それをランダムな組み合わせで呈示した。1 条件の刺激は、30 秒間のクリップが 30 種類、連続的に組み合わさった 15 分間の映像であった。なお、条件 1、2、3 の映像に関しては、色情報を削除することで、

グレースケールの映像パターンとした（図 2.7）。

条件 6 と 7 のスライドについては、パワーポイント（Microsoft 社）により制作された、黒色の背景に白色の文字を配置したスライドが、ランダムな順序で呈示されるように設定した。具体的には、ロービジョンや晴眼者の標準的な読書速度や読書に適切な文字サイズなどを測定することを目的に作られた MNREAD チャートの日本語版である、MNREAD-J チャートをもととし、黒地のスライドの中央に 3 行程度の白文字を配置した [14]。用いた文章は、MNREAD-J チャートで用意されているもの、および比較的平易な文章で記述された理工書 [15]の文中から同程度の分量を抜粋したものを用いた。その際、各条件において、上記 2 種類の文章によるスライド数が均一になるようにした。

グレースケールの映像パターン

フルカラーの映像パターン

スライド

図 2.7　条件における呈示刺激

1 条件の呈示時間は、映像パターンと同様 15 分間であり、180 枚のスライドのなかから 90 枚のスライドをランダムに抽出し、10 秒間隔で呈示した。また、スライドの 2 条件において、同じスライドが重複することがないようにした。文字の大きさは、スライドにより異なるように設定し、MNREAD-J チャートで用意されている 19 スケールのなかから 10 種類を用いて、それらが、実験環境において MNREAD-J チャート使用時と同じ視角になるようにフォントサイズを選択した（表 2.4）。また、実験前に、一番小さい文字サイズで書かれた文章を被験者に音読させることで、確実に読むことができることを確認した。なお、使用したフォントは、MS ゴシックであり、表 2.4 にある 10 種類のフォントサイズを、ランダムに各スライドに割り当てた。また、各フォントの使用回数は 2 条件の 180 枚のスライドにおいて、同数となるようにした。

表 2.4　スライドの呈示刺激における文字条件

logMAR	視角（分）	視角（度）	投射した文字の大きさ(cm)	フォントサイズ(pts)
1.2	180.7	3.0	13.1	60
1.1	143.5	2.4	10.4	48
1.0	114.0	1.9	8.3	40
0.9	90.6	1.5	6.6	32
0.8	71.9	1.2	5.2	23
0.7	57.1	1.0	4.2	20
0.6	45.4	0.8	3.3	16
0.5	36.0	0.6	2.6	14
0.4	28.6	0.5	2.1	10
0.3	22.7	0.4	1.7	8

（３）実験手順および被験者

評価指標には、実験１で得られた５つの眼精疲労の自覚症状項目を用いた。観察前後、および観察 15 分後に眼精疲労の自覚症状調査を行った。眼精疲労の自覚症状に関する調査では、実験１の結果より、症状「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の５つの症状項目に対し、５件法での回答を求めた。各実験条件の観察時間は、15 分間とし、条件間には 15 分間の休憩を挟み、次の条件に影響を与えないよう配慮した。また、休憩中には、半構造的なインタビュー調査を併せて行った。刺激呈示の前後に、5 項目からなる眼精疲労の自覚症状調査を５件法で行った。各条件の観察後および実験終了後には、見え方や眼の状態などに関するインタビュー回答を求めた。

以下に、実験の手順を示した。

（1）色覚調査

（2）刺激呈示前の眼精疲労の自覚症状調査（観察前）

（3）いずれかの条件による刺激呈示（15 分間）

（4）刺激呈示後の眼精疲労の自覚症状調査（観察直後）

（5）休憩（15 分間）

休憩中には、半構造的なインタビュー調査を併せて行った。

（6）休憩後の眼精疲労の自覚症状調査（観察 15 分後）

なお、休憩後の自覚症状の評点が、刺激呈示前の水準に回復しているかを確認したうえ、次の条件での実験を実施した。また、15 分間の休憩で回復がみられない、あるいは被験者から訴えがあった場合は、その時点で実験を中止することとした。実験は、被験者ごとに 7 条件をランダムな順序で選択して行った。被験者は、心身ともに健康な大学生および大学院生 30 例であった。また、色覚障害の条件下での CBU に関する研究は報告されていないため、今回の実験に関しては刺激呈示前に色覚障害に関する検査を行い、正常色覚者のみを対象とした [15)]。なお、実験は個別に行った。

２．４．３　結果と考察

結果の解析は、評価実験 1 と同様、観察後の評定点を、観察前の評定点をベースラインとした変化率に変換し、検討した。症状と条件間の変化について被験者内 2 要因分散分析を行ったところ、項目($F = 6.937$、$p < .01$)と条件($F = 6.619$、$p < .01$）の主効果がそれぞれ有意であった。これは呈示刺激について、項目ごとの変化率が異なることを意味し、また呈示刺激による条件の設定が妥当であったことを示している。変化率の平均値から、すべての症状において、条件 6、7 の変化率が顕著に高くなっていた。これは、スライド条件は、映像パターン条件と比較して、観察者への負担が大きいことを示唆している。症状「眼が疲れる」($F = 3.716$、$p < .05$)、「眼の圧迫感」($F = 3.247$、$p < .05$)、「眼の奥が痛い」($F = 3.565$、$p < .05$)、「眼が重い」($F = 3.146$、$p < .05$)、「チカチカする」($F = 3.685$、$p < .05$）の症状 5 項目に関し、いずれも有意差が認められた。図 2.8 にその結果を示す。

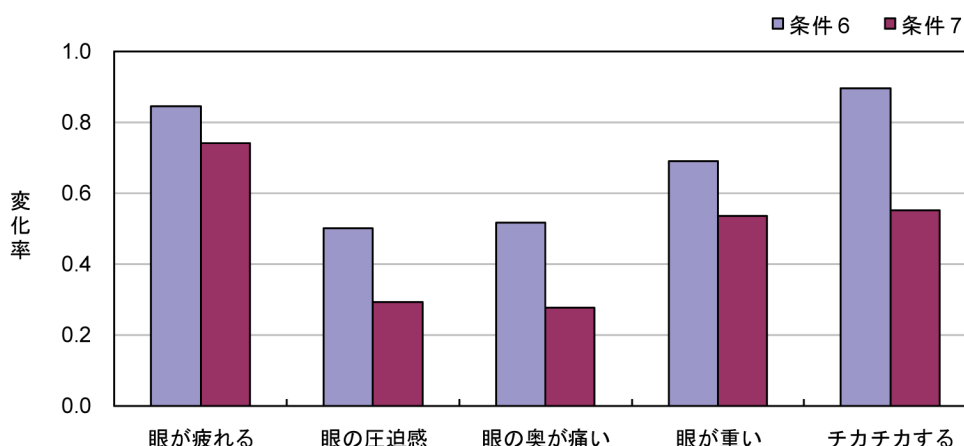



図 2.8 スライド条件における自覚症状の結果

下位検定の結果、条件 6 は、条件 1 と条件 4 より高い変化率が表れ、症状「眼が疲れる」（F = 8.048、p < .01）、「眼の圧迫感」（F = 6.666、p < .01）、「眼の奥が痛い」（F = 5.552、p < .01）、「眼が重い」（F = 7.102、p < .01）、「チカチカする」（F = 10.978、p < .01）の症状 5 項目に関し、いずれも有意差が認められた。条件 1 と条件 4 の間には有意差が表れなかった。その一方、条件 7 は条件 3 と条件 5 との間に二つの自覚症状、「眼が疲れる」（F = 4.503）、「眼が重い」（F = 3.518）に対して有意差が表れた（p < .05）。これらの自覚症状は、条件 3 と条件 4 の間には有意差は表れなかった。結果的に、スライドの刺激において、LCD 条件は二つの自覚症状に高い変化率を見せ、単板式 DLP 条件ではすべての自覚症状に対して影響を与えられたと考えられる。

5 つの症状の中では「チカチカする」が、条件 1、4、6 の、表示方式に単板式 DLP を使用した実験条件の変化率が最も高く示された。この症状は、評価実験 1 でも高い変化が表れたことから、CBU に対する特徴的な症状として考えられる。その中でも、スライドの刺激を用いた条件 6、7 において変化率が顕著に高くなっていた。また、インタビュー調査の結果からは、条件 6 と条件 7 の観察後に「チカチカする」という回答が、いずれの条件においても 30 例中 9 例あり、その他の条件よりも訴えが多かった。症状「チカチカする」の結果を、図 2.9 に示した。

また、すべての症状に関していずれも、観察後 15 分間の休憩に対して、観察前と同程度まで回復していることが分かった。

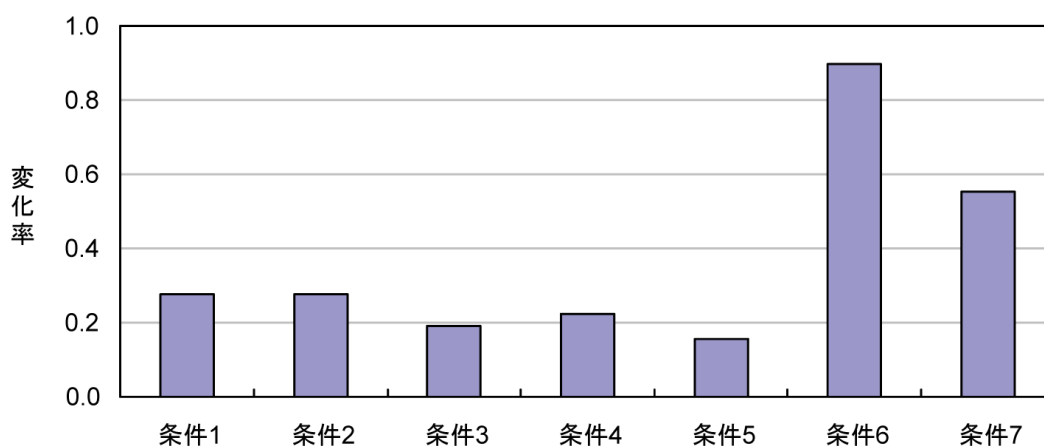



図 2.9　症状「チカチカする」の結果

次に、実験後のインタビュー調査より、CBU の認識の有無は異なるが、いずれの被験者も疲労感や不快感があることが分かった。本実験においては、30 例中 15 例が CBU に気付き、不快感や疲労感を覚えたが、残りの 15 例は、観察による何らかの違和感はもっていたものの、それが 3 原色の分離に起因していると気付かなかった。つまり、CBU を認識していなかったことになる。そこで、CBU を認識していた被験者群（以下、被験者群 Y）と認識していなかった被験者群（以下、被験者群 N）とに分け、比較を行った。ここでは、単板式 DLP を表示デバイスに用いた、条件 1、4、6 の 3 条件のうち、1 条件でも CBU を認識していると考えられる回答をしている被験者を、被験者群 Y とした。なお、被験者群間における各症状の解析は、条件 1、4、6 において、条件ごとに、症状別の解析と同様の方法で、被験者群別に行った。その結果、条件 1、4、6 に、症状「チカチカする」に関して被験者群 Y の方が被験者群 N に比べ、変化率が高くなっている（図 2.10）。

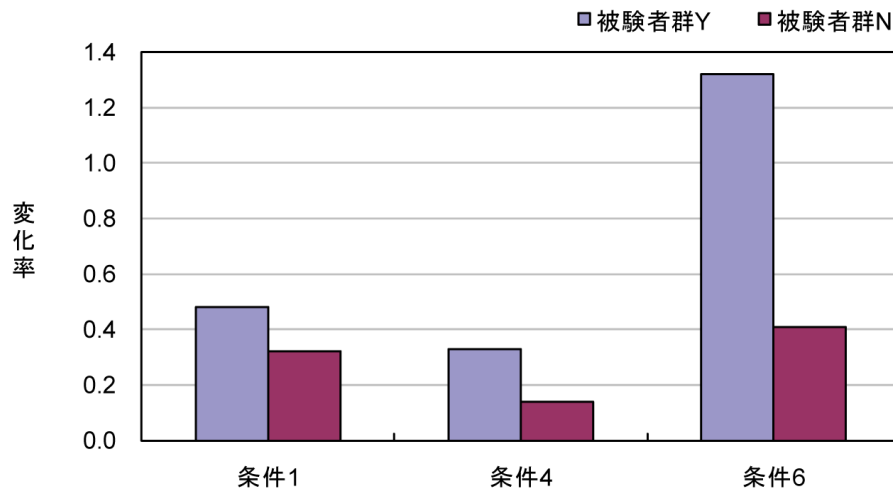



図 2.10　症状「チカチカする」グループ別の結果

特に、条件 6 では、被験者群 Y の方が、被験者群 N よりも、すべての自覚症状項目において、変化率が高くなっていることが分かった（図 2.11）。t 検定の結果、症状「眼が疲れる」（$t = 2.23$）、「眼の圧迫感」（$t = 2.48$）、「眼の奥が痛い」（$t = 2.40$）、「チカチカする」（$t = 2.24$）において、有意差が認められた（$p < .05$）。CBU を認識していた被験者群が、スライド呈示刺激に対して高い変化率を示したのは、CBU を認識しながらも、テキストを読まなければならなかったことから、心理的な負担が働いたと考えられる。

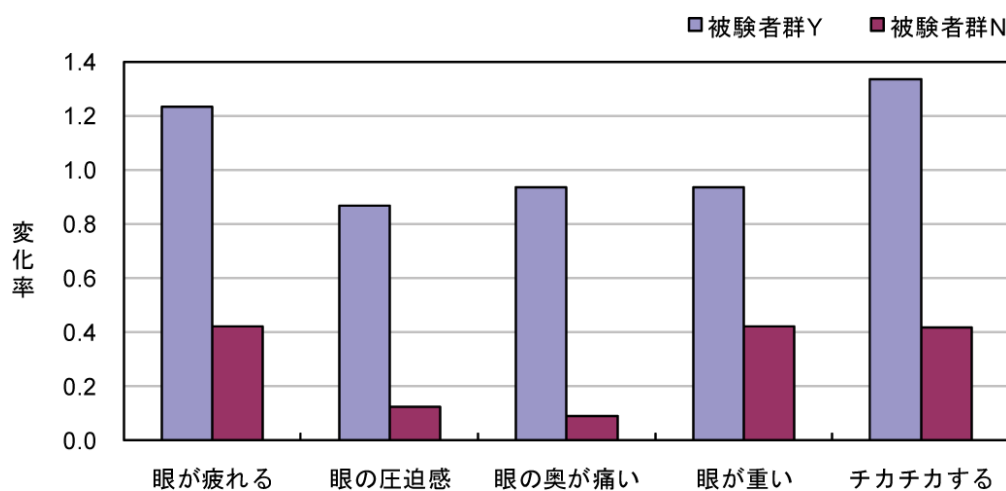



図 2.11　条件 6 の被験者別の結果

２．５．まとめ

本章では、実際のプロジェクター使用環境を想定し、色順次表示方式に起因する CBU に対して、心理指標を用い、生体に与える影響を明らかにした。また、CBU が顕著に発生する刺激を用い、眼精疲労の自覚症状の中、特徴的に変化する症状を特定した。さらに、プロジェクターの実際の使用場面を考慮し、映画やスライドの刺激を用い、特定された自覚症状を中心に、眼精疲労に与える影響を調べた。本章をまとめると次のようになる。

・色順次表示方式に起因する CBU は、短時間の視聴でも疲労感や不快感を与える要因の一つとなる。また、これらの症状の持続時間は短く、一定の休憩により回復される。

・CBU の特徴的な症状として、「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の項目があげられる。そのなか、症状「チカチカする」に対しては、二つの実験ともに、高い変化率を見せた。

・映画など映像条件では、視線方向を拘束されないことから、CBU による影響は少なかったと考えられる。

・スライド観察においては、観察者は文章を読むという行為から、一定の視線移動を促される。そのため、サッケード時に CBU が頻繁に知覚され、眼精疲労や不快感を生じさせる可能性が考えられる。

・CBU を認識していたグループの方が、認識していないグループよりも、眼精疲労の自覚症状項目において、変化率が高くなった。

結果から、色順次表示方式に起因する CBU が、眼精疲労の自覚症状を含めた、生体に与える影響を確認することができた。また、CBU の特徴的な症状として、5 項目を特定することが可能となり、これらの自覚症状をもとに、プロジェクターの実際の使用場面を考慮し、映画やスライドを用いて評価実験を行った結果、CBU の有無により、

眼精疲労の度合いに差が表れた。一方、眼精疲労の自覚症状項目の抽出の際には、被験者数が少ないことから、同類の指標を次の実験に繰り返し、使用することで実験結果の信頼性を確かめた。今後は、統計学的手法上、有意水準の判定に十分な被験者数を確保したうえ、CBU による生体影響を詳細に検証する必要がある。また、色順次表示方式によるプロジェクターを安全かつ快適に利用するには、表示するコンテンツを選定するうえ、視聴時の照度を明るくするなど、CBU の知覚しにくい視環境を考慮することが重要と考えられる。

参考文献

1) M. Mori, T. Hatada, K. Ishikawa, T. Saishoji, O. Wada, J. Nakamura, N. Terashima : "Mechanism of color breakup in field-sequential-color Projectors", SID Digest, pp. 350-353 (1999)

2) O. Wada, J. Nakamura, K. Ishikawa, T. Hatada : "Analysis of color breakup in field-sequential color projection system for large area displays", Proc. IDW, pp. 993-996 (1999)

3) T. Jarvenpaa : "Measuring color breakup of stationary images in fieldsequential-color displays", Journal of the SID, 13, pp. 139-144 (2005)

4) L.J. Hornbeck : "Digital Light Processing for high-brightness, high-resolution applications", Proc. SPIE, 3013, Projection Displays III, pp. 27-40 (1997)

5) D. Dudley, W. Duncan, J. Slaughter : "Emerging digital micromirror device (DMD) applications", Proc. SPIE, 4985, pp. 14-25 (2003)

6) D. S. Dewald, S. M. Penn, M. Davis : "Sequential color recapture and dynamic filtering: a method of scrolling color", SID 01 Digest, 32, pp. 1076-1079 (2001)

7) M. L. Jepsen, M. J. Ammer, M. Bolotski, J. J. Drolet, A. Gupta, Y. Lai, D. Huffman, H. Shi, C. Vieri : "High resolution LCOS microdisplay for single-, double- or triple-panel projection systems", Displays, 23(3), pp. 109-114 (2002)

8) 森峰生，畑田豊彦，石川和夫，最勝寺俊大，和田修，中村旬一，寺島信義 : "単板継時混色型プロジェクターにおけるカラーブレイクアップの解析", 映像情報メディア学会誌，53(8), pp.　1129-1135 (1999)

9) 和田修，中村旬一："色順次駆動プロジェクションディスプレイに関するカラーブレイクアップの解析"，ディスプレイアンドイメ-ジング，9(2)，pp. 129-137 (2001)

10) A. Yohso, K. Ukai : "How color break-up occurs in the human-visual system: the mechanism of the color break-up phenomenon", Journal of the SID, 14, pp. 1127-1133 (2006)

11) M. Ogata, K. Ukai, T. Kawai : "Visual fatigue in congenital nystagmus caused by viewing images of color sequential projectors", Journal of Display Technology, 1(2), pp. 314-320 (2005)

12) 鈴村昭弘："眼疲労"，眼科，23，pp. 799-804 (1981)

13) 太田啓路，河合隆史，海老根吉満，山口理恵："TV ゲームによって引き起こされる 3D 酔いの評価"，日本バーチャルリアリティ学会誌，9(4)，pp. 343-352 (2004)

14) MNREAD-J Acuity Charts : http://www.cis.twcu.ac.jp/~k-oda/MNREAD-J/ (2010)

15) 河合隆史，田中見和："次世代メディアクリエータ入門 1 立体映像表現"，カットシステム (2003)

16) S. Ishihara : "Ishihara's Tests for Color Deficiency (Concise Edition)", Kanehara Trading Inc. (2003)

第３章　色順次表示方式における生体影響の客観評価

３．１　本章の目的

本章の目的は、表示方式の特性に基づき、色順次表示方式における生体影響について、検討することである。心理指標を用いた評価実験では、色順次表示に起因する CBU に対して、「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の項目を、特徴的な自覚症状として特定した。また、これらの自覚症状をもとに、プロジェクターの実際の使用場面を考慮し、映画やスライドを用いて評価実験を行った結果、CBU の有無により、眼精疲労の度合いに差が表れた。心理指標の場合、被験者の主観的な心理状態が大きく作用することから、生理指標を取り入れることにより、生理的反応をより客観的に把握することが可能となる。そこで、本研究では、色順次表示方式の時空間特性である CBU を対象として、生理指標を用い、人間工学的観点から観察者の与える生体影響を調査することを目的とした。

第 2 章 2 節 1 項で述べたように、各メーカーは、カラーホイールの種類や回転速度を変えることにより、デバイスの色再現を向上させている。CBU は、色順次表示方式に起因するため、システムの種類や技術向上により、軽減されることも考えられる [1)]。眼球が常に動いている先天眼振を有する者を対象とした実験では、カラーホイールの回転速度が、CBU の見え方に影響を与える可能性が示されたが [2)]、健常者を対象とした実験はまだ行われていない。本章では、カラーホイールの種類や回転速度が異なる色順次表示方式による生体への影響も考慮すべく、健常者を対象に、評価実験を行った。評価実験は大きく三つに分かれて行われ、評価実験 1 では、眼球運動の測定による、生体への影響を調べた。第 2 章 2 節 2 項の説明のように、色順次表示方式は、サッケードのような高速眼球運動を行う際、CBU が知覚される。すなわちサッケードを誘発する刺激を用いることで、特定の眼球運動の働きを活発にさせ、CBU を顕著に知覚させることが可能となる。実験では、コントラストの強い文字で構成されたスライドを用いることにより、読む行動によるサッケードが CBU を引き起こす環境を設定した。それにより、刺激呈示による眼球運動の変化を調べることにより、生体への影響を明らかにすることを想定した。

評価実験 2 では、色順次表示方式を採用した多様な表示デバイスを対象に、精神的ストレスの測定による、生体への影響を調べた。第 2 章の実験後のインタビュー調査では、

CBU が疲労感と不快感に与える影響が大きいことが報告された。このような 変化は、CBU が、眼精疲労だけでなく、精神的ストレスにも影響を与えることが考えられる。こうした、色順次表示方式の観察時に、さまざまな刺激に対する精神的ストレスの変化を調べることにより、CBU による生体影響をより明確に検討することが可能となる。

３．２　生体影響評価の生理指標

３．２．１　眼球運動の測定

眼球運動には、網膜像を安定させるための補償性眼球運動と、視対象を視野中心に移動させるための随意性眼球運動に分けられる [3)]。本研究では、随意性眼球運動の中での特にサッケード中の問題を扱うため、随意性眼球運動を中心に調べる。

随意性眼球運動は、サッケード、滑動性追従眼球運動（SPM;smooth pursuit eye movement、以下 SPM）、輻湊・開散運動、前庭動眼反射（Vestibulo-Ocular Reflex）、回旋眼球運動に分類される [3)]。サッケードとは、視対象を網膜の中心窩（Fovea Centralis）に写すため、視線が目標とする視対象に停留し、次の注視点に向けてすばやく移動する断続的かつ瞬間的な動きをする眼球運動である。サッケードは高速な眼球運動であり、速度はその振幅が大きくなるに連れて早くなる。SPM は、視標を網膜の中心窩で捉えて追う、スムーズで緩やかな動きをする眼球運動である。追従できる対象の速度の範囲は、5～60 度/s 内であり、比較的ゆっくりと運動する視覚刺激に対して、眼球をほぼ同スピードで追従し、これ以上のスピードになると、サッケードを交えて追従を行う [4)]。

輻湊・開散運動は、輻両眼の奥行き方向への視対象の変換の追従時に起こる眼球運動である。視線を遠くから近くに移動させる時を輻湊（Convergence）と、近くから遠くに移動させる時を開散運動（Divergence)、と呼ぶ。最大速度は 20 度/s で、両眼立体視の重要な視覚機能と密接な関係がある [3)-5)]。前庭動眼反射は、頭を傾けないで回転させたときに視線方向の変化を自動的に補う眼球運動である。回旋眼球運動は視線を軸として回転する眼球運動である。

眼球運動は、呈示刺激の移動方向や速度により、発生する種類や頻度などの状況が異なる。それにより、視環境を調整し、呈示刺激を選別することで、刺激による特徴的な眼球運動への影響を測定することが可能である。眼球運動にともなう、CBU の知覚を

図 3.1 に示す。色順次表示方式プロジェクターにおいて（a）固視の状態で、白い縦ストライプが水平移動される場合、(b）視標を SPM で捉え追う場合、もしくは頭部を回転する場合（c）視標をサッケードで捉え追う場合とする。CBU はサッケード時に知覚されることから、(c）条件のみに知覚される。

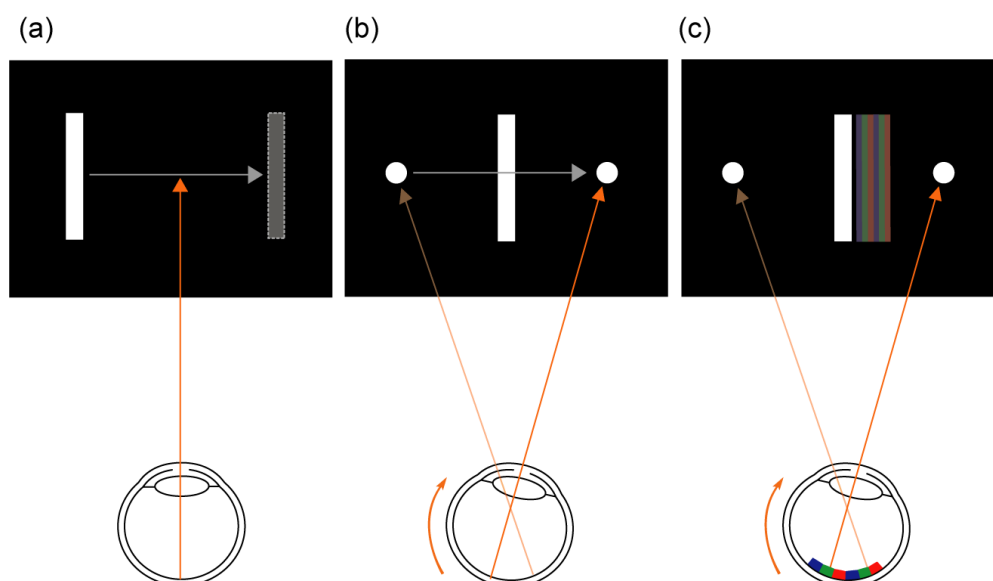



図 3. 1　眼球運動と CBU の知覚

眼球運動の測定方法は、リンバストラッカー法、角膜反射法、サーチコイル法、EOG 法などに分類される[6]。今回の実験では、非接触であり、水平・垂直方向に対して同一の精度で、しかも広範囲に眼球運動を測定することが可能である、角膜反射法を用いて眼球運動を測定した。角膜反射法は、赤外線を角膜に照射し、その反射光の移動を利用して眼球運動の軌跡を記録する測定法である。今回の実験に用いた眼球運動測定器は、角膜反射法を採用したアイマークレコーダー（ナックイメージテクノロジー社、以下 EMR）である。

赤外線を角膜にあてると、光は角膜前面、角膜後面、水晶体前面の各屈折面で反射され、プルキニエ像と呼ばれる角膜反射像を作る。この反射像の位置と、瞳孔中心位置の相対的な距離から、視線の位置を検出し、アイマークで表示するというのが EMR の原理である[7]。EMR は、被験者の視線の座標データを片眼計測時には 60Hz、両眼計測時には 30Hz でサンプリングした後、視野映像中にコード化して挿入することで、1 秒間に 60 回の眼球運動の測定が可能である。この方法で得られた視線の座標データを専用

の解析システムに取り込むことで、停留などの各種眼球運動の分析ができる[8]。

EMR は近年、さまざまな評価研究において、眼球運動の測定用として利用されている。三根らは、子どもの絵本の読み方を実証的に明らかにするために、EMR を実験に用いた[9]。子どもの絵本の読み方は非常に個人差があるが、被験者全体に共通する特徴として、停留点は文字から文字、絵から絵へと、同等の構成要素間を連続して移動することが確認された。また、被験者をグループ化した場合、理解度の高い被験者ほど、見開きページをより広範囲にみており、見開き左右両ページを行き交う回数の増加につながることが示された。さらに、文字を一定時間見ているのと同時に、それ以上の時間を絵の鑑賞に費やしていることが明らかになった。

恩田らは、EMR を用いて注視位置を計測し、眼球運動と瞬目頻度の測定を行うことで、直視型立体ディスプレイで呈示される視覚刺激が及ぼす人体への影響の評価を行った[10]。具体的には、直視型立体ディスプレイを用いた 3DCG 画像の呈示による負荷を与えた際の視機能・自律神経系機能を、同一 CG コンテンツを 2D で呈示した際と比較することで、3DCG に画像による負荷の人体への影響の評価を試みた。眼球運動を測定した結果、瞬目頻度に関しては有意な差は認められなかったが、調節応答の検査結果のうち緊張側の調節応答速度について、3D の場合において負荷を与えた直後から負荷を与えた 60 分後までの間、有意な減少が認められた。結果的に、医療用 CG 画像による 3D 映像による負荷が及ぼす視機能・自律神経系機能への影響の測定から、視覚疲労・自律神経系バランスの変化の他覚的・定量的評価を行うことで、直視型立体ディスプレイ試作機の安全性について明らかにした。

そして、伊藤らは、将棋の科学的研究に EMR を評価指標の 1 つとして利用した[11]。将棋を題材に次の一手問題をさまざまな棋力の被験者に提示して、指し手を決定するまでの思考過程を発話プロトコルと EMR を用いて測定した。その結果、将棋の上級者以上の被験者では、単に局面に対する駒の配置に関する知識が形成されるだけでなく、局面をその前後関係からとらえられる知識が獲得されることを明らかにした。また、将棋の上級者になるにつれ、深く大量に先読みすることが分かった。これらの結果は、従来のチェスの研究で見られるような「空間的チャンク」だけでなく、時間的な前後関係を含んだ「時間的チャンク」の存在の可能性を示唆している。

本実験においては、色順次表示方式プロジェクターによる、CBU が、観察者の眼球運動に影響を与えるという仮説をもとに、EMR を指標として利用することとした。

３．２．２　精神的ストレスの測定

精神的ストレスの生体反応としては、自律神経系と内分泌系が知られ、ストレス刺激に対して、それぞらの変化を指標として用いることで、測定が可能となる。従来のストレス検査では、主に、コルチゾール、またはカテコールアミンがマーカーとして利用されてきた。最近、精神的ストレスの評価指標として注目を浴びているのが、唾液中のクロモグラニン A（以下 CgA）である。唾液中 CgA は、副腎髄質クロム親和性細胞や交感神経ニューロンから分泌される主要な蛋白質の 1 種であり、カテコールアミンとともに細胞外へ分泌されることが知られている[12]。

唾液中 CgA の特徴としては、まず、内分泌・神経系に広く分布し、特に副腎髄質と下垂体に高濃度で検出されることがあげられる。唾液中 CgA はカテコールアミンとともに貯蔵され、血液中にともに放出される。さらに、唾液腺にも存在し、自律神経系の刺激によって唾液中に放出される。唾液中 CgA を測定することによって、自律神経系の活動を調査することが可能となる。また、精神的ストレスのみに反応することと、唾液中から採取するため、計測間隔の制約が少ないという長所を持つ。こうした特徴から、唾液中 CgA は、近年、さまざまな研究において、ストレス評価指標として利用されている。

中根らは、唾液中 CgA をストレス指標として利用するという開発を行い、既知のストレス指標物質と比較した[13]。評価指標には、唾液中 CgA、コルチゾール、カテコールアミンを使用した。ストレス負荷には、研究発表、自動車運転、肉体的ストレスを課した。その結果、唾液中 CgA は、研究発表、自動車運転などの、精神的ストレス負荷時には、他の指標物質よりも先行して上昇し、負荷後には早期に減少することが分かった。また、肉体ストレスの負荷に対しては、その反応は乏しいことが判明された。その結果は、唾液中 CgA が高感度な精神的ストレスの指標として有用である可能性を示唆している。

宮川らは、唾液中 CgA をストレス指標として用い、騒音による生理学的影響の評価を行った[14]。騒音曝露による唾液中 CgA の変化を調べ、騒音による急性的なストレス反応の測定可能性に関する検討を行った。実験室にて被験者 20 名に 90dB のホワイトノイズを 15 分間曝露し、唾液中 CgA の変化を測定した。実験の結果、唾液中の CgA は曝露中に有意な増加が見られ、曝露の終了とともに減少した。また、被験者の個人差についても検討し、高度受性群(交感神経の亢進が持続する傾向がある群)の存在の可能

性を示した。これにより、唾液中 CgA によって、騒音によるストレス反応を、尿や血液を採取する方法よりも簡単に測定可能であることが示された。

そして、齋藤は、個人の気分や嗜好に合わせて固有な映像刺激を選択できるシステムを併用し、その個人に特異的な色彩映像刺激による心理効果を調べた [15]。被験者 40 名に対し、花と海の 5 色彩系からなる映像刺激を呈示し、その前後で多面的感情状態評価と唾液中 CgA を測定した。その結果、映像選択システムを導入した色彩映像観察後、唾液中 CgA の有意な低下が見られ、映像選択システムを導入した色彩映像により、不快な感情が低下して精神的緊張が緩和される可能性が示唆された。

唾液中 CgA は、精神的ストレスの指標としての有効性が報告された以来、さまざまな実験で使用されており、現在もっとも注目を浴びている指標ともいえる。本実験においては、色順次表示方式における CBU が、観察者にとって精神的ストレスとなり得る仮説をもとに、唾液中 CgA を指標として利用することとした。

３．３　眼球運動による色順次表示方式の生体影響

３．３．１　本実験の目的

本実験では、色順次表示方式に起因する、CBU を対象として、表示デバイスの安全かつ快適な視環境にかかわる、基礎的な知見を得ることを目的とする。色順次表示方式の観察時に、観察者の眼球運動を計測することで、CBU の有無によって構成された、条件間の差異や特徴を明らかにすることを目指す。また、表示方式の違いによる、視覚情報の受容の差異に関しての検討も行う。実験対象としては、CBU が生じる、色順次表示方式と、そうでない方式を用意し、刺激呈示前後での心理および生理的変化を測定し、比較を行った。指標としては、眼精疲労の自覚症状に関するアンケートの調査に加え、眼球運動の測定を用いた。方法としては、方式の違いが眼球運動に与える影響について、二つの評価実験を通して比較・検討を行った。評価実験 1 では、プロジェクターの利用場面として、プレゼンテーション用途を想定し、刺激として、多様な文字サイズのスライドを呈示し、眼精疲労の自覚症状と眼球運動の測定を行った。評価実験 2 では、評価実験 1 の結果をもとに、CBU の影響の顕著な刺激を対象とすることで、CBU による生体影響、とりわけ眼球運動の測定による視覚特性の明確化を目的とした。

３．３．２　実験方法

（１）実験環境

実験室は、呈示刺激と関係のない光が結果に影響を与えるのを避けるため、暗幕を張って光を完全に遮断した。また、プロジェクターには、CBU が生じる 2 倍速の単板式 DLP（Hewlett-Packard、xb31）と、CBU が生じない 3 板式 LCD（EPSON、EMP-TW200H）の 2 種類を用いた。なお、各プロジェクターは、画面全体に白色を呈示した場合にスクリーン中央での照度がほぼ同一となるよう調整した（条件 1;226 lx、条件 2 ; 220 lx）。刺激の呈示環境は、視距離 250cm で 100 インチスクリーンを観察するよう設定した。スクリーンに対して中央の位置に配置した椅子に被験者を着席させ、被験者の眼の高さが、ほぼスクリーンの中心位置となるよう調整した。その際、被験者の顎を顎台に固定し、頭部の動きが眼球運動に影響を与えるのを防いだ。実験環境を図 3.2 に示す。

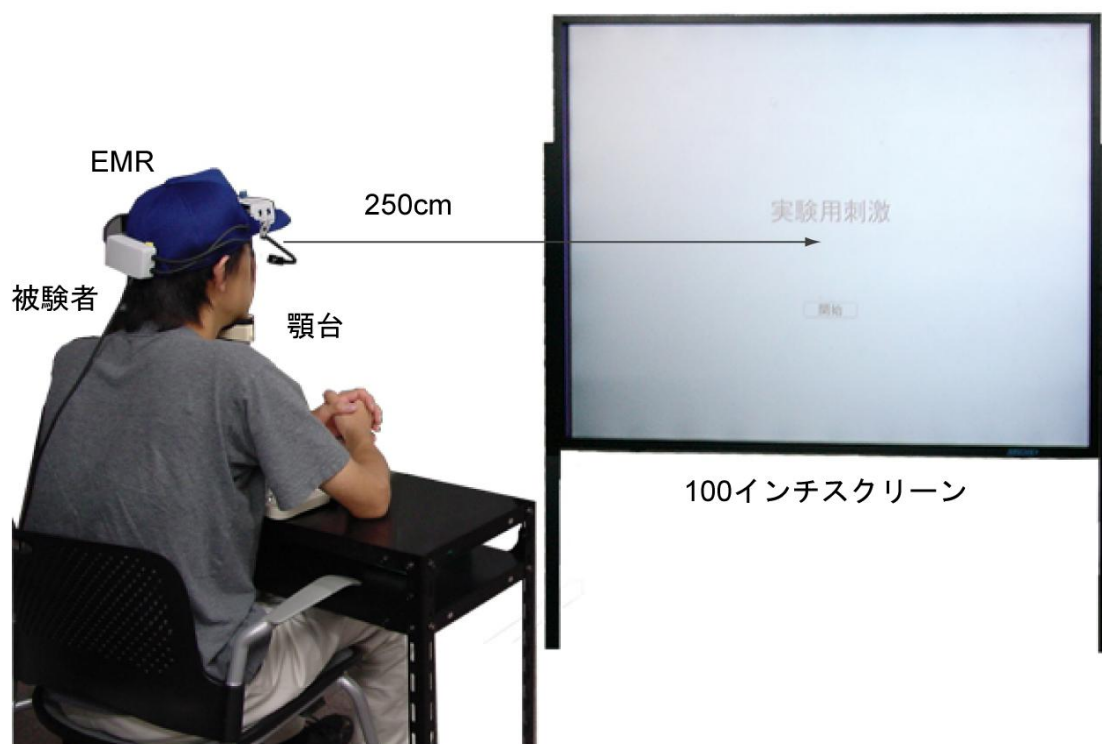



図 3.2　実験 1 の実験環境

（２）呈示刺激

評価実験 1 の呈示刺激は、第 2 章での条件 6 と 7 で使用したパワーポイントによるスライドを 90 枚用意した。各スライドは、条件ごとに一枚を 10 秒間呈示し、1 条件の呈示時間は 15 分間になるよう設定した。被験者に文章を読ませることで、眼球運動として停留とサッケードが繰り返され、CBU を生じさせることを意図した（図 3.3)。

評価実験 2 の呈示刺激としては、実験 1 で呈示した 90 枚のスライドのなかから、重複がないようランダムに 30 枚を抽出し、フォントサイズを 60pts に統一したものを使用した。刺激の呈示時間は 5 分間とし、30 枚のスライドを一枚につき 10 秒間ずつ、ランダムな順序で呈示した。

また、順序効果が実験結果に与える影響を確認するため、被験者を半分に分け、刺激の呈示順序ごとに被験者が同数となるよう調整した。被験者には、すべての条件に対してスライドの文章を 2 回ずつ繰り返して読むように指示した。これは、被験者の視線が呈示刺激以外の場所に停留し、サッケードと関係のない停留データが実験の結果に影響を与えるのを軽減することを意図したものである。

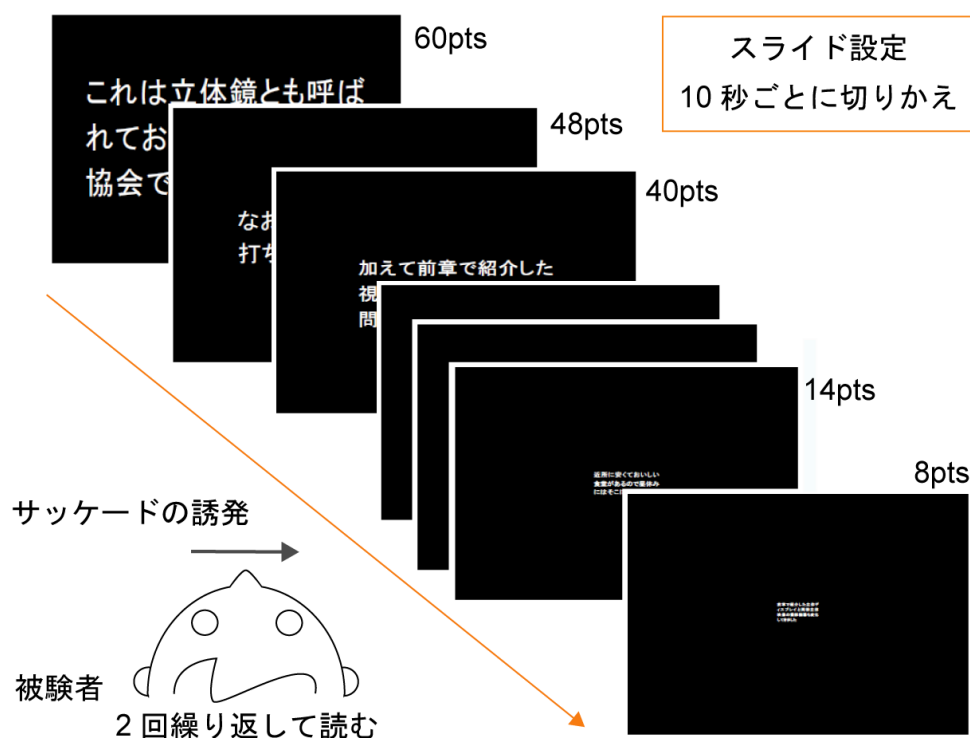



図 3.3　実験 1 の呈示刺激

（３）実験手順および被験者

評価指標には、眼精疲労の自覚症状に関するアンケートと、観察中の眼球運動の 2 種類を用いた。アンケートは、第 2 章の実験で CBU の影響が反映されやすいと考えられた、「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の 5 つの症状項目を用いた。これらの項目に対する回答を、疲れの度合いとして 5 件法で求めた。調査は、刺激の観察前・後、および観察 15 分後に行った。各実験条件の刺激観察時間は評価実験 1 では 15 分間とし、評価実験 2 では 5 分間と設定した。刺激の呈示後には 15 分間の休憩を挟み、アンケートの回答により被験者の眼精疲労の回復を確認した。また、休憩中には、インタビュー調査を併せて行い、被験者の感想を聞いた。

今回の実験では、CBU の知覚が眼球運動に与える影響を考察するため、角膜反射法を採用した眼球運動測定装置を用いた。実験に用いた眼球運動測定装置は、EMR を用い、サッケードと関連がある停留データの記録を行った（図 3.4）。EMR の視野カメラは、被験者の両眼を測定対象とするため、レンズの視野角を 44 度に設定した。これはスクリーンに対する被験者の水平視野角が 44.2 度になり、EMR に装着可能な 3 種類のレンズ（44 度、62 度、92 度）の角度中、44 度が被験者の水平視野角に一番近いためである。

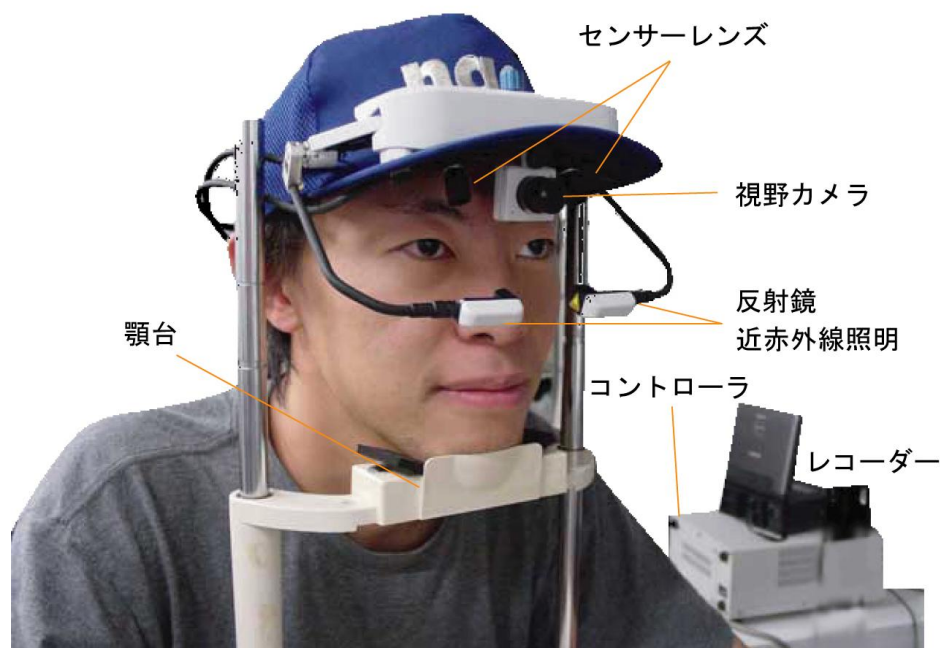



図 3.4　EMR を用いた眼球運動測定の様子

以下に実験手順を示す。

（1）色覚・屈折値調査

（2）刺激呈示前の眼精疲労の自覚症状調査（観察前）

（3）刺激呈示　（実験 1；15 分、実験 2；5 分）および眼球運動測定

（4）刺激呈示後の眼精疲労の自覚症状調査（観察直後）

（5）休憩（15 分間）

※休憩中には、半構造的なインタビュー調査を併せて行った。

（6）休憩後の眼精疲労の自覚症状調査（観察 15 分後）

被験者は、評価実験 1 では、心身ともに健康な 20 代の男性 8 例を対象とした。評価実験 2 では、被験者には、裸眼で両眼の屈折値が±1D を超えない、20〜30 代の男性 5 例を対象とした。被験者は全員 CBU に対する知識がない者で、実験前に、アーチファクトの発生に関する情報は与えず、先入観が実験の結果に影響を与えないよう配慮した。また、刺激呈示前に色覚障害に関する検査を行い、正常色覚者のみを対象とした。実験は、評価実験ごと、また条件ごとに個別に実施した。

３．３．３　結果と考察

（１）眼精疲労の自覚症状調査およびインタビュー調査

眼精疲労の自覚症状に関するアンケートの調査結果を、刺激呈示の前後に分け、観察後の評定点を観察前の評定点をベースラインとした変化率に変換し、項目ごとに検討を行った。具体的には、条件ごとに「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の 5 項目の変化率を求めた。

変化率に関しては、二つの評価実験ともに、すべての項目で条件 1 の方が条件 2 より高いという結果が見られた。項目別に条件間の変化で t 検定を行ったところ、評価実験 1 では、「眼が疲れる」（$t = 3.03$、$p < .05$）、「眼の圧迫感」（$t = 5.23$、$p < .05$）、「眼の奥が痛い」（$t = 3.52$、$p < .05$）、「眼が重い」（$t = 4.32$、$p < .05$）、「チカチカする」（$t = 2.23$、$p < .05$）の全項目で、いずれも有意差が認められた（図 3.5）。これらの結果は、第 2 章のスライド条件における自覚症状の結果と類似しており、CBU を有する条件の方が、すべての自覚症状に対して影響を与えたと考えられる。

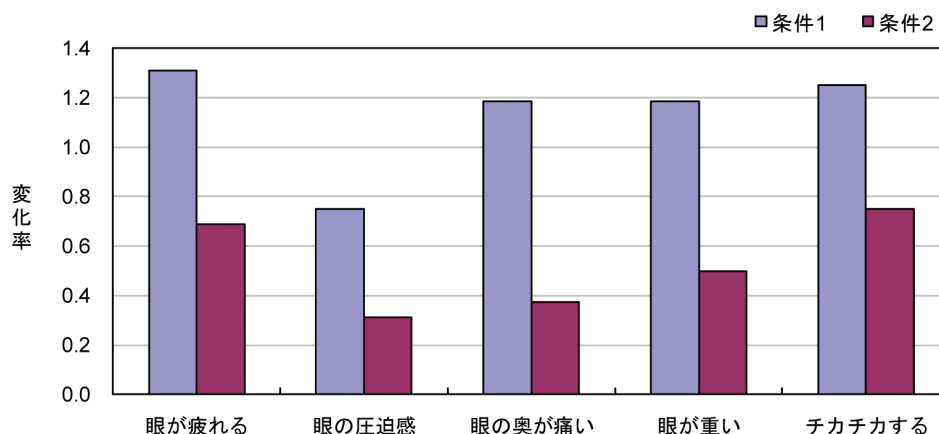



図 3.5　眼精疲労の自覚症状の結果（評価実験 1）

評価実験 2 では、t 検定の結果、「眼の圧迫感」（$t = 9.00$、$p < .01$）、「眼の奥が痛い」（$t = 8.57$、$p < .01$）、「眼が重い」（$t = 4.74$、$p < .01$）、「チカチカする」（$t = 3.67$、$p < .01$）の 4 項目において、1%水準で有意差が認められた(図 3.6)。評価実験 1 と比べ、刺激の呈示時間が短い反面、フォントサイズが大きくなったことにより、「チカチカする」をはじめとする特徴的な項目に影響を与えたと考えられる。

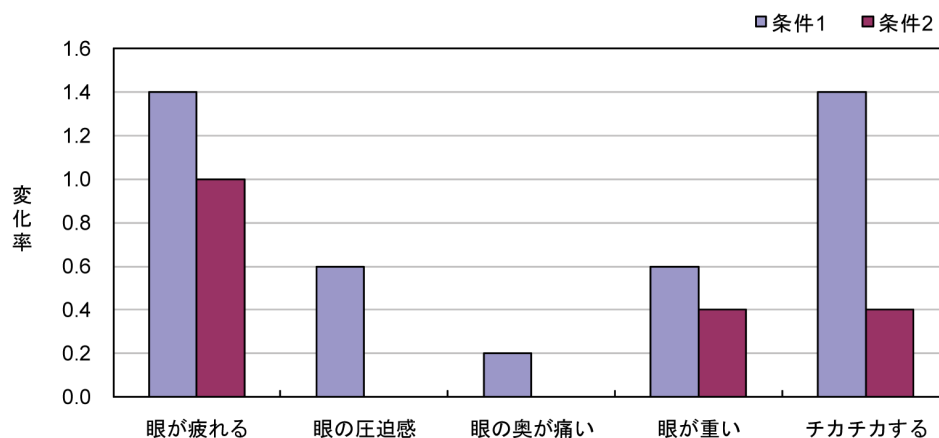



図 3.6　眼精疲労の自覚症状の結果（評価実験 2）

次に、インタビュー調査の結果では、評価実験 1 では、観察後の「眼が疲れる」という回答が、条件 1 の方が条件 2 より多く見られた。また条件 1 の場合、「文字が大きいと眼がチカチカする」、「文字が大きくなったとき、色が分離して見えた」、「文字の大きさによって色割れの大きさが変わった」など、文字のサイズが CBU の知覚に影響を与

えることが示唆された。評価実験 2 では、呈示された刺激に対して、被験者全員が CBU を知覚していたことが分かった。また、それによる不快感を訴える意見が多かった。例えば、「目で文字を追うと色が分離して気になった」、「画面の切り替えの際、色の分離が生じ、不愉快だった」など眼球運動によって CBU が生じ、眼精疲労の原因となり得る意見が聞かれた。

（２）EMR による眼球運動の測定

プロジェクターにより呈示された文字を読む際の視覚特性に着目し、CBU と眼球運動との関係を検討した。具体的には、二つの評価実験を実施し、呈示刺激の観察時の停留時間を分析し、CBU の有無による、条件間での差を明らかにした。停留データの解析は EMR 解析システム（Model-SP-505）を用いた。

EMR による解析には、裸眼で眼の障害がない被験者を対象とする必要がある。評価実験 1 では、被験者 8 例中、裸眼で両眼の水晶体の屈折値が±1D を超えない被験者 4 例の優位眼の停留データを対象に解析を行った。この際、被験者の優位眼は左右それぞれ 2 例ずつで、優位眼の差による結果への影響は見られなかった。評価実験 1 の解析の結果、条件 1 と条件 2 の間で、スライドの文字の読み方に差が見られた。文字サイズが大きい刺激に対して、CBU を生じる条件 1 の方が条件 2 より長く、頻繁に停留することが分かった。図 3.7 は刺激として呈示された 84 枚目のスライド（フォントサイズ 60pts）観察時の、条件 1 と条件 2 の停留データの視線軌跡である。停留時間は円図形の大きさによって表現され、円と円を結ぶ線は視線の移動軌跡を表現している。

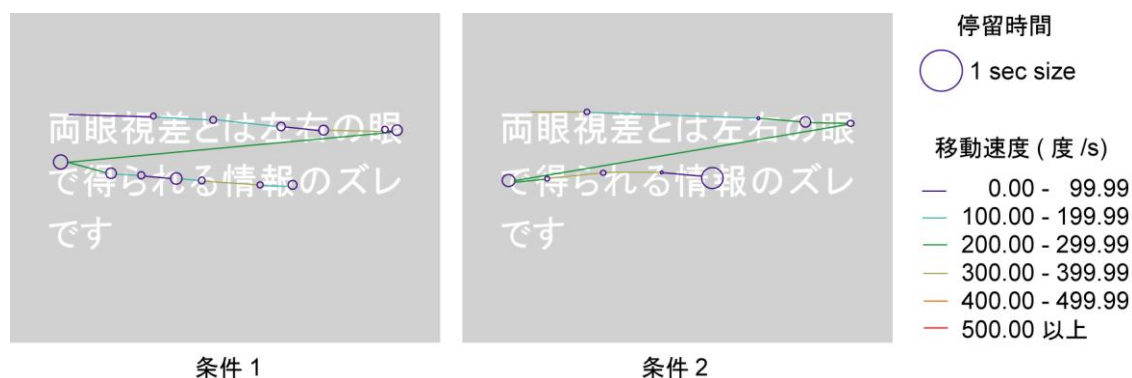



図 3.7　スライド 84 枚目における停留データ視線軌跡（被験者 K）

そこで、停留データをもとに、文字サイズの差が大きいフォントサイズ 10pts のデータとフォントサイズ 60pts のデータに対して、停留時間に関する解析を行った。条件間で t 検定を行ったところ、停留時間について、60pts のスライドを呈示した刺激のみ、有意差が認められた（$t = 3.44$、$p < .05$）。条件 1 の場合は、フォントサイズが大きくなっても停留時間の変化が見られなかったが、条件 2 では、フォントサイズが大きくなるにつれ、停留時間が有意に減少した。図 3.8 に条件 1 と条件 2 に関する停留時間の結果を示した。結果から、色順次表示方式の条件の方が LCD プロジェクターの条件より、総停留時間が長く、停留回数が多く観測された。これらの結果を、被験者のインタビュー調査で報告された「フォントサイズが大きくなったとき、眼が疲れた」などの意見と合わせると、フォントサイズの大きさによって CBU が顕著に起こり、呈示された文字が読みづらくなって停留時間と停留回数が増えたものと考えられる。

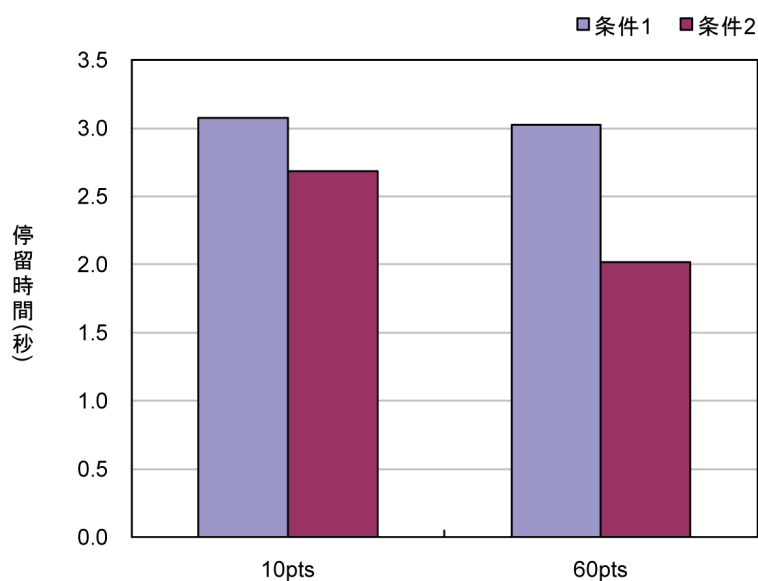



図 3.8　フォントサイズ別の停留時間の結果（評価実験 1）

評価実験 2 では、実験 1 と同様に、EMR を用いて刺激呈示時の眼球運動を測定した。CBU と眼球運動の関係を明らかにするために、条件ごとの停留回数および停留時間と移動速度の分析を行った。解析は、すべての呈示刺激に対するアイマークデータから、文字の読み動作と直接関係する停留データのみを抽出して行った。つまり、各スライドの文章を文頭から文末まで 1 回通して読み終えた時点を対象とした。これは、読み動作の被験者間での個人差が大きく、読み終えた後の停留データを排除するためであった。

停留データを対象に、条件間で t 検定を行ったところ、停留時間 ($t = 7.82$、$p < .05$)、と停留回数（$t = 2.56$、$p < .05$）の項目において有意差が認められた（図 3.9)。停留時間および回数について、実験 1 の方が条件 2 より増大する結果が示されたが、移動速度に関しては、条件間の差は見られなかった。これは、CBU はサッケード後に行われる視野の安定性に影響を与えて知覚される現象と考えられ [16)]、サッケードによる移動速度をコントロールすることで、CBU の知覚を抑制することは難しいことを示す。

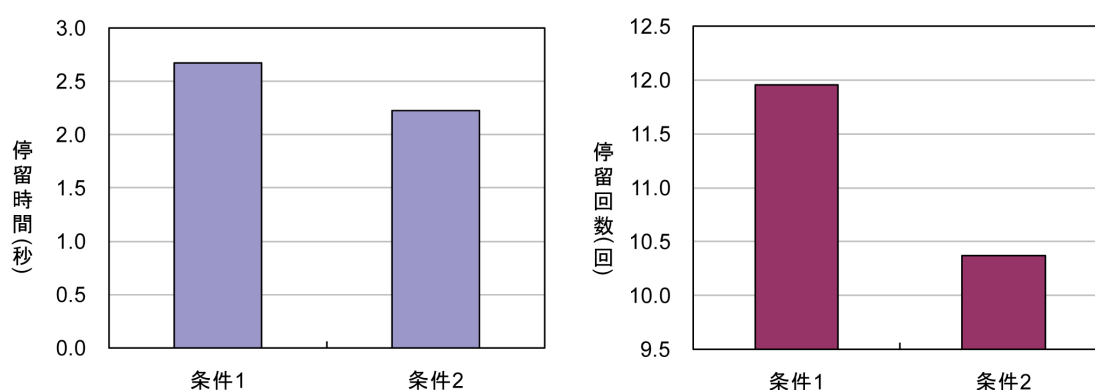



図 3.9　停留時間（左）および停留回数（右）の結果（評価実験 2）

結果から、フォントサイズが大きくなるとともに白文字が認識しやすくなり、CBU の発生しやすい環境になり、眼精疲労が、停留時間および停留回数の上昇に影響を与えたと考えられる。

３．４　精神的ストレスによる色順次表示方式の生体影響

３．４．１　本実験の目的

本実験では、客観評価に基づき、色順次表示方式のプロジェクターによる CBU を対象として、観察の際の、視覚負担、および精神的ストレス状態について検討、評価することを目的とした。

具体的には、色順次表示方式の 3 種の周波数のプロジェクター、3 板式 LCD、色順次表示方式のリアプロジェクションテレビ、3 板式 LCD リアプロジェクションテレビをそれぞれ用意し、各方式の与える影響について比較・検討を行った。

３．４．２　実験方法

（１）実験環境

実験は、暗室で行い、刺激の呈示環境としては、プロジェクター条件では、視距離を250cm で 100 インチスクリーンを観察するように設定した。スクリーンに対して中央の位置に配置した椅子に被験者を着席させ、被験者の眼の高さが、ほぼスクリーンの中心位置となるよう調整した。また、リアプロジェクションテレビ条件では、視距離を144cm で観察するように設定した。これは、現在市場に出ているリアプロジェクションテレビの視野角が、30 度と想定されていることから算出し、設定した。それぞれアスペクト比 16:9 のワイド型テレビに、アスペクト比 4:3 の画面を出し、実際に投影される画面の大きさを測定した。実験環境を図 3.10 に示す。

図 3.10　実験環境（リアプロジェクションテレビ条件）

（２）実験条件

実験条件は、6 種類の表示方式において、同一の呈示刺激を使用し、計 6 条件の実験条件を設定した。表示方式には、プロジェクターとリアプロジェクションテレビを用いた。プロジェクターは、4 種を用意し、うち 3 種が異なる周波数を持つ単板式プロジェクターであり、残る 1 種が 3 板式 LCD（LCD）であった。色順次表示方式おける色再現は、一般的に 1/60 秒ごとにカラーホイールの色構成が入れ替わることを 1 倍速とする。本章で実験対象として用いた表示デバイスは、プロジェクターとして、2 倍速単板

式DLPプロジェクター(2倍速DLP)、3倍速単板式DLPプロジェクター(3倍速DLP)、5倍速単板式DLPプロジェクター（5倍速DLP）で、リアプロジェクションテレビとして、5倍速単板式DLPリアプロジェクションテレビ（5倍速DLP-PTV)、LCDリアプロジェクションテレビ（LCD-PTV）の2種を用意した。表3.1に6種類の表示方式に構成された実験条件を示す。

表 3.1　実験条件

条件	表示デバイス
1	2倍速 DLP
2	3倍速 DLP
3	5倍速 DLP
4	LCD
5	5倍速 DLP－PTV
6	LCD－PTV

呈示刺激には、第2章3節の刺激と同様、黒い背景に水平視角1度の正方形、正円形、正三角形の視標を、画面内の左右の位置に、5秒間隔でランダムに呈示し、被験者にはその図形を5分間注視させた。そして、正円形が呈示されたときには、手元のマウスをクリックさせ、被験者が確実に刺激を観察していることを確認した。

（３）実験手順および被験者

評価指標には、唾液中CgAの測定を用いた。また、5項目の眼精疲労の自覚症状調査も併せて行った。唾液の採取、眼精疲労の自覚症状調査は、観察前後、および観察15分後に行った。具体的には、眼精疲労の自覚症状に関する調査では、第2章の結果より抽出された、症状「眼が疲れる」、「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」、「チカチカする」の5つの症状項目に対し、5件法での回答を求めた。各実験条件の観察時間は、5分間とし、観察後15分間の休憩を挟んだ。観察後には、半構造的なインタビュー調査を行った。また、1日に実施する実験は2条件を限度とし、その条件間には2時間以上の休憩を取り、次の条件に影響を与えないよう配慮した。なお、実験は、被験者ごとに6条件をランダムな順序で選択して行った。

以下に、実験の手順を示した。

（1）眼精疲労の自覚症状調査（観察前）
（2）唾液中 CgA の採取（観察前）
（3）刺激呈示（5 分間）
（4）唾液中 CgA の採取（観察直後）
（5）眼精疲労の自覚症状調査（観察直後）
（6）インタビュー調査
（7）休憩（15 分間）
（8）唾液中 CgA の採取（観察 15 分後）
（9）眼精疲労の自覚症状調査（観察 15 分後）

被験者は 8 例で、薬物等を服用していない、心身ともに健康な男性の大学院生であった。女性はホルモンの分泌が唾液中 CgA の測定値に影響を及ぼす可能性があることから、本実験における被験者はすべて男性とした。なお、実験は個別に行った。

３．４．３　結果と考察

（１）眼精疲労の自覚症状調査およびインタビュー調査

眼精疲労の自覚症状に関する結果の解析は、観察後の評定点を、観察前の評定点をベースラインとした変化率に変換し、検討した。

症状「眼が疲れる」の結果を、図 3.11 に示した。この症状は、有意差はなかったものの、条件によって変化率が高くなっていた。インタビュー調査の結果、「眼が疲れる」と訴えた被験者は、条件 5 において 8 例中 6 例と最も多く、条件 1 では 8 例中 3 例だった。また、「眼は疲れていない」と回答した被験者も、比較的多く見られ、条件 2 では、8 例中 7 例と、多数を占めており、続いて条件 3、4、6 では、8 例中 6 例と、過半数の被験者が回答していた。

条件 1 から 4 のプロジェクター条件では、2 倍速 DLP を使用した条件 1 が、変化率が最も高く、インタビュー調査による訴えがあった。また、5 倍速 DLP-PTV の条件 5 においても、変化率の上昇と、インタビュー調査による多数の訴えがあったことが分かった。

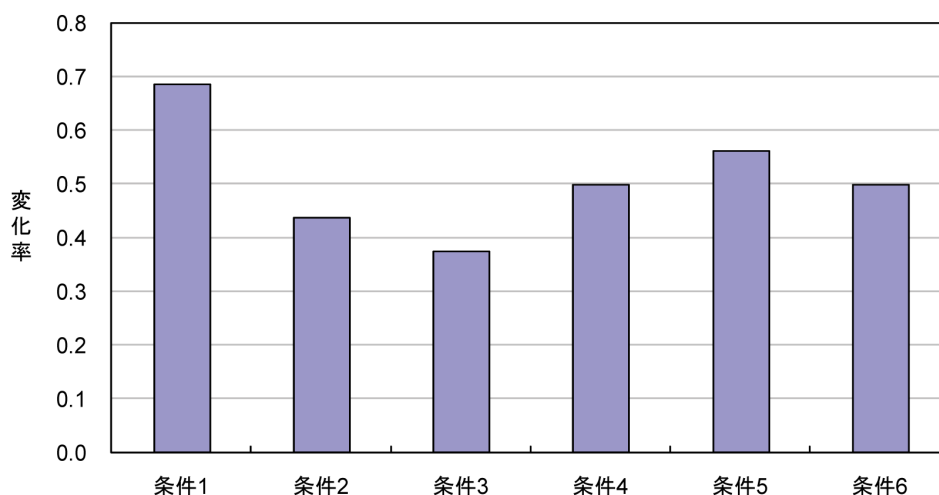



図 3.11　症状「眼が疲れる」の結果

「眼の圧迫感」、「眼の奥が痛い」、「眼が重い」項目に関しては、大きな変化は見当たらなかった。次に、症状「チカチカする」の結果を、図 3.12 に示した。この症状でも、有意差はなかったものの、CBU 現象を生じる条件の場合、変化率が高くなっていた。症状「チカチカする」に関しては、第 2 章でも述べたように、CBU による特徴的な症状と考えられ、その結果がアーチファクトを生じない、条件 4、6 の LCD 条件における変化率と、その他の条件の変化率に差として表れたと考えられる。インタビュー調査の結果、「チカチカする」と訴えた被験者は、条件 1 において 8 例中 3 例だった。また、「チラチラする」と回答した被験者も少数いた。

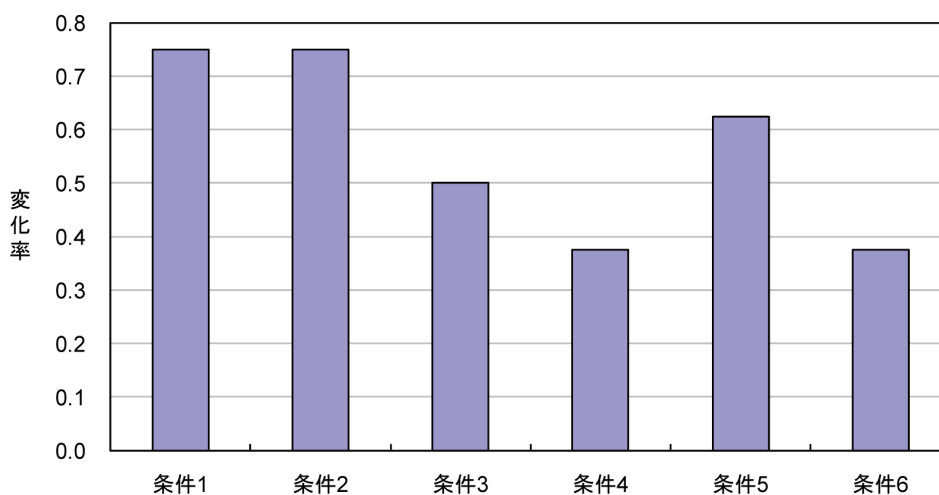



図 3.12　症状「チカチカする」の結果

（２）精神的ストレス調査

唾液中 CgA 濃度は、総蛋白濃度によって補正し、mg 蛋白あたりのモル濃度で表示した。そして、観察後の測定値を、観察前の測定値をベースラインとした変化率に変換し、検討した。

変化率から、表示方式の違いによる傾向がみられた（図 3.13)。条件間の有意差は表れなかったものの、プロジェクターを使用した、条件 1 から 4 では、単板式 DLP の 3 条件が、周波数が高くなるに従い変化率が低くなり、さらに、LCD の条件 4 は、プロジェクター4 条件内で最も変化率が低くなっていた。また、リアプロジェクションテレビ条件においても、条件 6 の LCD-PTV の方が、条件 5 の 5 倍速 DLP-PTV よりも変化率が低くなっており、プロジェクター条件と同様の傾向が見られた。

被験者ごとに、各条件の上昇をみると、条件による特徴的な傾向は異なっていた。被験者により、各条件によって与えられたストレス状態は異なっていたと考えられる。インタビュー調査の結果からも、CBU に敏感な被験者がいることが分かったが、その不快感により、生理指標も上昇していたと考えられる。条件 1、2 においては、変化率が他の被験者に比べ、高くなる被験者がそれぞれ 1 例ずつ見られた。

さらに、生理指標として、唾液中 CgA 濃度の測定を行うことで、主観評価での眼精疲労の自覚症状調査ではあまり大きな変化が見られなかった被験者にも、刺激呈示により、条件ごとに感じるストレスに大きな差があることが明らかになった。

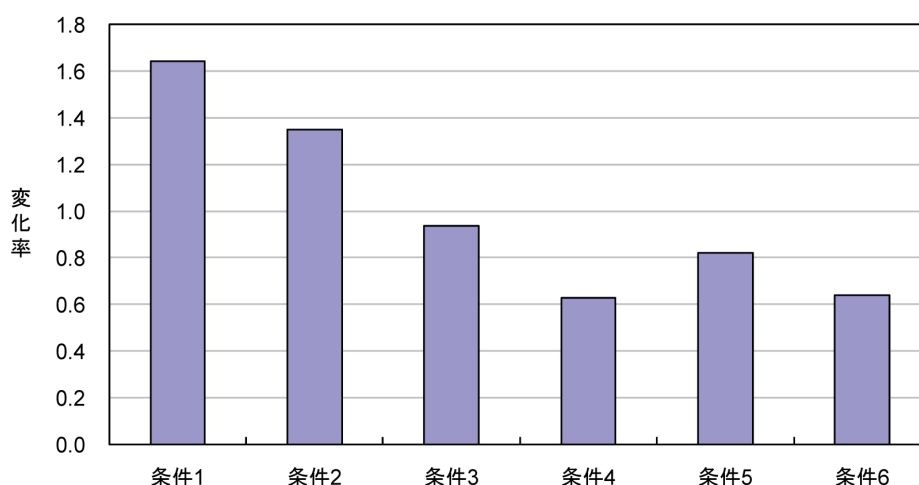



図 3.13　唾液中 CgA 蛋白補正値結果

本実験においては、CBU の起こる 4 条件すべてにおいて、CBU を認識していなかった被験者は、8 例中 1 例であった。インタビュー調査より、この被験者は「画像がぼやけて見える」と回答していたが、その他、CBU を認識したと思われる回答はなかった。

また、被験者別に、CBU を認識していたかについて、インタビュー調査の結果から分類した。本実験では、先にも述べたように、CBU が起こる全条件において、認識していなかったと判断された被験者は 1 例だったため、条件ごとに CBU を認識していた被験者（被験者群 Y）と、そうでない被験者（被験者群 N）に分け、解析を行った。その結果、CBU を認識していたのは、2 倍速 DLP の条件 1 では 8 例中 6 例、3 倍速 DLP の条件 2 では 8 例中 5 例、5 倍速 DLP の条件 3 では 8 例中 5 例、5 倍速 DLP-PTV の条件 5 では、8 例中 5 例であった。それら 4 条件の、被験者群別の結果を図 3.14 に示す。この結果より、CBU が起こる 4 条件すべてにおいて、被験者群 Y の変化率のほうが、被験者群 N よりも高くなっていることが分かった。

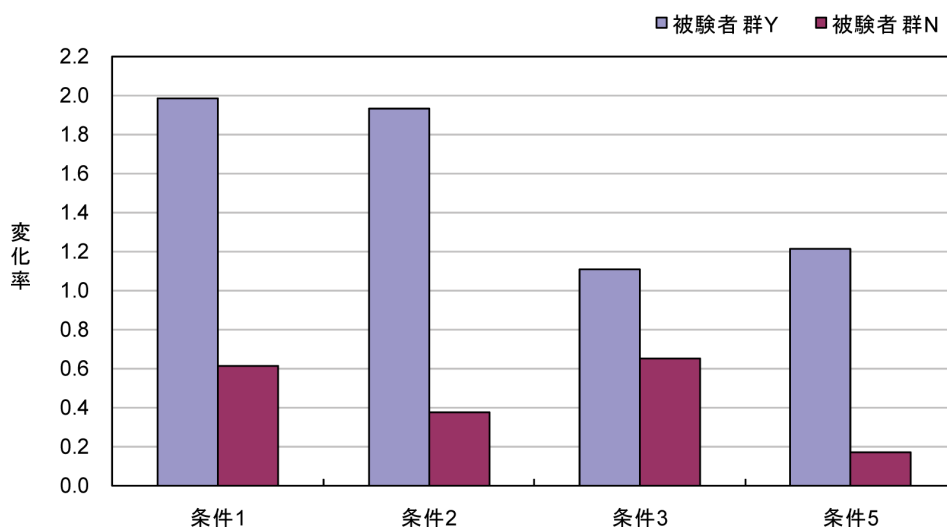



図 3.14　唾液中 CgA 蛋白補正値被験者群別結果

この結果は、第 2 章で行った、被験者群別でのスライド条件における、眼精疲労の自覚症状の結果でも、同様の傾向が見られた。本実験で使用した呈示刺激は、左右の眼球運動を誘発する刺激であるという点で、スライド条件で使用した、スライドの文章を読ませるという呈示刺激に類似する。第 2 章での考察でも述べたように、CBU を認識している被験者も、呈示刺激の特性上、サッケードのような高速眼球運動を余儀なくされ

た。それにより、CBU を認識しているにもかかわらず、呈示刺激を注視することにより、不快感が増したと考えられる。このことから、CBU の認識の有無により、心理指標の眼精疲労の自覚症状だけでなく、生理指標の精神的ストレスにも、変化率の差が見られると示唆された。

本実験においては、表示方式に投影型と反射型の 2 種類を用いた。唾液中 CgA 濃度結果からは、単板式 DLP では、リアプロジェクションテレビの条件 5 の変化率は、投影型であるプロジェクターの、条件 1、2、3 に比べ、低くなっていた。リアプロジェクションテレビ条件は、プロジェクター条件と比較し、画面のサイズ、視野角の狭さから、観察者への負担が低かったと考えられる。LCD 方式に関しては、その変化率は、投影型の条件 4 と反射型の条件 6 とでは大きな差は見られなかった。また、個人差はあるものの、DLP プロジェクターでは、周波数が高くなるにつれ、観察による精神的ストレスは抑えられる傾向にあった。CBU による精神的ストレスを軽減させるためには、周波数の高いプロジェクターを使用することの有効性が考えられる。

３．５　まとめ

本章では、実際のプロジェクター使用環境を想定し、色順次表示方式に起因する CBU に対して、生理指標を用い、生体に与える影響を明らかにした。評価実験 1 においては、色順次表示方式の時空間特性に注目し、眼球運動の測定を指標として用い、評価実験を行った。評価実験 2 では、性能の異なる複数の色順次表示方式を対象に、単純刺激を用い、精神的ストレスの測定を指標として、評価実験を行った。本章をまとめると次のようになる。

・CBU は、コントラスト比が大きく、読む行動など、サッケードを頻繁に行う刺激を呈示する場合、短時間の視聴でも、眼精疲労の自覚症状に影響を与える可能性がある。

・眼球運動の測定から、CBU は、サッケードを誘発する刺激に対し、サッケード時の停留時間や回数を増加させる可能性がある。

・色順次表示方式では、カラーホイールの回転周波数が高くなるにつれ、観察による眼精疲労や精神的ストレスの度合いが低くなった。色順次表示方式によるアーチファク

トの発生を軽減するために、カラーホイールの回転速度や色構成を工夫することは、有効と考えられる。

・観察者は、CBU に対して、認識の有無にかかわらず、眼精疲労や精神的ストレスに影響を与え得る。また、被験者によっては、CBU を認識することにより、その影響を受けやすくなった。

結果から、色順次表示方式に起因する CBU が、眼球運動や精神的ストレスを含めた、生体に与える影響を確認することができた。色順次表示方式によるプロジェクターを安全かつ快適に利用するには、表示するコンテンツや使用環境を考慮するとともに、ハードウェア技術による CBU を解決することが重要である。例えば、色順次表示方式で、プレゼンテーションを行う場合、コントラスト比を調節するなど、CBU の発生しにくいデザインにすることで、観察者に与える影響を軽減できる可能性がある。また、色順次表示方式に、カラーホイールの回転周波数を高めることで、不快感など、精神的ストレスの軽減につながることも考えられる。一方、CBU といったアーチファクトは、表示デバイスの時空間特性や視聴環境によって、複数が同時に知覚することも考えられる。今回の実験は、CBU の影響を主な目的として実験環境を設定したが、アーチファクトの知覚は人間の心理・生理的特性にかかわることから未知な点が多く、使用したシステム特性を含めて発生条件や生体影響に関するさらなる検討が求められる。今後は、本研究の成果を踏まえて、表示デバイスの時空間特性として DMD の ON-OFF 特性や LCD の応答速度に注目し、アーチファクトの生体影響に関する研究を深めていく必要がある。

参考文献

1) M. J. Baker, J. Xi, J. Chicharo, E. Li : “A contrast between DLP and LCD digital projection technology for triangulation based optical profilometers”, Proc. SPIE, 6000, pp. 60000G (2005)
2) 尾形真樹，鵜飼一彦，梅澤恵美，河合隆史：“色順次方式で提示された映像を見ることに起因する先天眼振の眼精疲労”，VISION，16(4)，pp．227-230 (2004)
3) 鵜飼一彦：“眼球運動の種類と測定法”，光学，23，pp．2-8 (1994)

4) 古賀一男 : “講座・感覚・知覚の科学　視覚 1　視覚系の構造と初期機能 (1) - 4. 眼球運動”, 朝倉書店，pp. 74 (2007)

5) 畑田豊彦 : “立体視機構と 3 次元ディスプレイ”, 日本視能訓練士協会誌, 16, pp. 19-29 (1988)

6) 古賀一男 : “講座・感覚・知覚の科学　視覚 1　視覚系の構造と初期機能 (1) - 4. 眼球運動”, 朝倉書店，pp. 79-85 (2007)

7) ナックイメージテクノロジー：取扱説明書 EMR-8 (2000)

8) ナックイメージテクノロジー：取扱説明書アイマークデータ解析システム model SP-505 (2003)

9) 三根慎二，汐崎順子，國本千裕，石田栄美，倉田敬子，上田修一：“眼球運動からみた子どもの絵本の読みと理解”，日本図書館情報学会春季研究集会発表要綱，pp. 55-58 (2005)

10) 恩田能成，鈴木康夫，井野秀一，奈良博之，松尾力，永井謙芝，伊福部達：“直視型立体ディスプレイで呈示される視覚刺激の人体影響評価”，日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集，pp. 439-442 (2000)

11) 伊藤毅志，松原仁，グリンベルゲン ライエル：“将棋の認知科学的研究(2)－次の一手実験からの考察”，情報処理学会論文誌，45(5)，pp. 1481-1492 (2004)

12) H. Blaschko, R. S. Comiline, F. H Schneider, M. Silver, A. D. Smith : “Secretion of a chromaffin granule protein, Chromogranin, from the adrenal gland after splanchnic stimulation”, Nature, 215(5096), pp. 58-59 (1967)

13) 中根英雄：“新規精神的ストレス指標としての唾液中クロモグラニン A”，豊田中央研究所 R&D レビュー，34(3)，pp. 17-22 (1999)

14) 宮川雅充，松井利仁，村山留美子，内山厳雄，伊藤俊弘：“騒音による生理的影響の評価-唾液中クロモグラニン A を指標として-”，環境衛生工学研究，18(3)，pp. 180-185 (2004)

15) 齋藤ゆみ，笹山哲，菅佐和子，池本正生：“色彩映像の心理的効果-映像選択システムの併用による色彩映像の感情刺激効果の検討-”, 日本補完代替医療学会誌, 5(3), pp. 225-232 (2008)

16) A. Yohso, K. Ukai : “How color break-up occurs in the human-visual system: the mechanism of the color break-up phenomenon”, Journal of the SID, 14, pp. 1127-1133 (2006)

第４章　立体表示方式における生体影響の主観評価

４．１　本章の目的

本章の目的は、表示方式の特性に基づき、立体表示デバイスにおける生体影響について検討することである。そこで、デバイスの起因するアーチファクトが知覚されやすい刺激を用意し、実際市販されているディスプレイを対象として、評価実験を行った。

立体映像は、平面映像（2D）では得ることのできない臨場感を演出することが容易に可能となり、次世代のディスプレイ技術の本命として期待されてきた。立体映像とは、左右眼の離れた間隔により生じる視差（両眼視差）を利用した 2 眼式立体と、多くの視差情報を表示する多眼式や、体積表示型、像再生型とに分類される [1]。そのなか、2 眼式立体映像（以下立体映像）は、現在の映像端末や技術を用いて、コンテンツの奥行き情報が表現可能となり、さらにその効果も大きいため、ディスプレイ産業における立体表示方法として注目を集めている。従来の立体表示デバイスは、2D 映像用のデバイスより視野角が狭く、多人数で自由な観察が困難といった問題や、位置や姿勢を選び、視聴環境に制約が多いことから、普及には至らなかった。また、カメラ等の制作環境の不整備や、良質なコンテンツ不足なども、普及を阻害する要因となった。

しかし、近年、ハリウッドを中心とする映画産業は、立体映像のエンタテインメント的な要素に注目し、独自の立体映像表現方法を開発し、コンテンツ制作に取り組んでいる [2)3]。また、既存の 2D 映像に奥行き情報を加え、人為的に両眼視差を与える 2D3D 変換技術も開発され、立体映画として撮影されていなくても、立体映像として鑑賞することも可能となっている [4]。上映システムの技術開発も進み、1 台のプロジェクターで立体映像の表示が可能となるシステムの開発も映画館の立体上映を後押ししている [5)-7]。その背景には、映画産業が、FPD 技術の向上による大画面化、次世代 DVD の登場によるメディアの高画質化、映像のネット配信事業の拡大による利便性に圧されており、映画館の観客が減少することに歯止めをかけるため、立体映像に注目することが考えられる。また、コンテンツ制作側から見ると、立体上映を行うことにより両眼視差を持つ映像が表示されることで、映画の無断複製が難しくなり、著作権保護にも寄与する利点がある。さらに、映画制作においては、ボケや透視図法などの奥行き感を運動視差や心理効果だけでなく、両眼視差という奥行き知覚を用いた新たな表現方法が可能になる。

このように、立体映像に接する機会が増えることで、立体映像に関する関心が高まり、

立体映像の家庭での普及を後押ししている。また、2010 年、多くの家電メーカーが、テレビを始めとする視覚情報デバイスとして、立体映像の表示が可能なデバイスを製品化している [8)-10)]。その背景には、従来、映像表示として用いられてきた FPD 技術が、大画面になることにより得られる 2 次元の奥行き表現が限界に達し、より臨場感を得るために、立体映像による奥行き情報を必要としたことも考えられる。

立体表示デバイスが次世代ディスプレイとして注目を集めている一方、各デバイスの時空間特性が生体に与える影響は明らかになってない部分が多い。現在、製品化を目指す立体表示デバイスの多くが、表示効率や技術的問題により、両眼視差を持つ左右の映像を、時間または空間で多重化して表示を行っている [11)]。多重化された左右イメージは、デバイスの方式ごとに、偏光フィルタまたは液晶シャッタメガネにより、左右の眼にそれぞれ分離呈示される。こうした多重化による表示方法は、限られたデバイス機能を効率よく配分することにより生まれた方式で、既存のデバイスに立体視関連技術を加えることで、立体表示デバイスとして生産可能なメリットがある。その一方、表示効率を追求することで、表示デバイスの時空間特性によるアーチファクトが発生する。こうしたデバイスの特性によるアーチファクトが生体に与える影響に関しては、いまだ明らかになっていない部分が多く、情報も少ないのが現状である。そこで本研究では、立体表示デバイスにおける時空間特性を理解し、アーチファクトによる生体への影響を明らかにすることを目的とし、基礎的な検討を行った。実験で使用したデバイスは、現在市販されているディスプレイを対象とし、液晶シャッタメガネを用いる時間多重化による表示方式（以下時間多重方式）と、偏光フィルタメガネを用いる空間多重化にによる表示方式（以下空間多重方式）を用いて検討を行った。

４．２　立体表示方式

４．２．１ 立体表示の分類

立体表示デバイスは、両眼用に作られた左右映像を刺激として呈示した際、脳が 2 つの視覚刺激を融合し、1 つの像になるように刺激を再構成しようとする働きを利用する。そのため、視差情報を持つ左右映像を、それぞれの眼に分離呈示する仕組みが必要であり、その仕組みを方式と言う。立体表示デバイスは、ビュアー方式、メガネ方式、裸眼方式の 3 種類に大別できる [12)]。

ビュアー方式とは、ディスプレイそのものを「のぞき込む」あるいは「頭部に搭載する」方式の総称である。前者はステレオスコープ方式、後者はヘッドマウント方式として、区別して扱われる。メガネ方式とは、左右の映像を多重化して表示するために、メガネを用いる方式で、主なメガネ方式としては、アナグリフ方式、色帯多重化方式、偏光フィルタ方式、液晶シャッタ方式がある。裸眼方式とは、観察時に特殊なメガネを必要としない方式で、左右の映像を多重化するための仕組みをディスプレイ側に装備させている。左右の映像を多重化して表示するために、既存のデバイス表面にスリット状のバリアやレンチキュラが付加される。

そのなか、メガネ方式は、メガネをかける不便さはあるものの、多人数で同時に視聴可能ということや、高画質でフルカラーの表示が可能ということから、次世代テレビとして注目されてきた。特に、現行のテレビ方式と両立性が高いことから、既存の FPD 技術に組み合わせられ、3D テレビとして可能性を示している。これらの表示デバイスは、両眼視差を持つ左右の映像を、時間または空間を左右映像用に多重化し、1 台のディスプレイで立体表示を行っている。本章では、現行、3D テレビの方式として、メガネ方式を対象に、時間および空間多重方式の時空間特性が生体に与える影響を検討した。

４．２．２ 時間多重方式

時間多重方式とは、左右映像を一定の周期で時間順次に表示し、これに同期した液晶シャッタメガネの開閉により、左右眼に分離呈示し、立体視を行う方式で、時分割立体方式とも言う。また、電気により駆動するシャッタメガネを用いるため、アクティブ方式とも呼ばれる。時間多重化による立体表示方式では、既存の FPD システムに液晶シャッタメガネと同期用の赤外線エミッタを用いることで立体視が可能となる。すなわち、左眼用の映像が表示された瞬間には、左眼のシャッタが ON（透過）、右眼のシャッタが OFF（遮蔽）状態になり、左眼のみに左映像が知覚される。続いて、右眼用の映像が表示される場合、上記の同様に右眼のみに右映像が表示され、脳の中での融合により両眼立体視が可能となる(図 4.1)。時間多重方式では、シャッタメガネの遮蔽速度の他、ディスプレイのリフレッシュレート、パネルの応答速度が立体映像の見え方に影響を与える[13)14)]。時間多重方式は、左右映像の時間差表示により一つの空間を再現するため、本来の呈示刺激には含まれてない、以下のような、アーチファクトが知覚される。

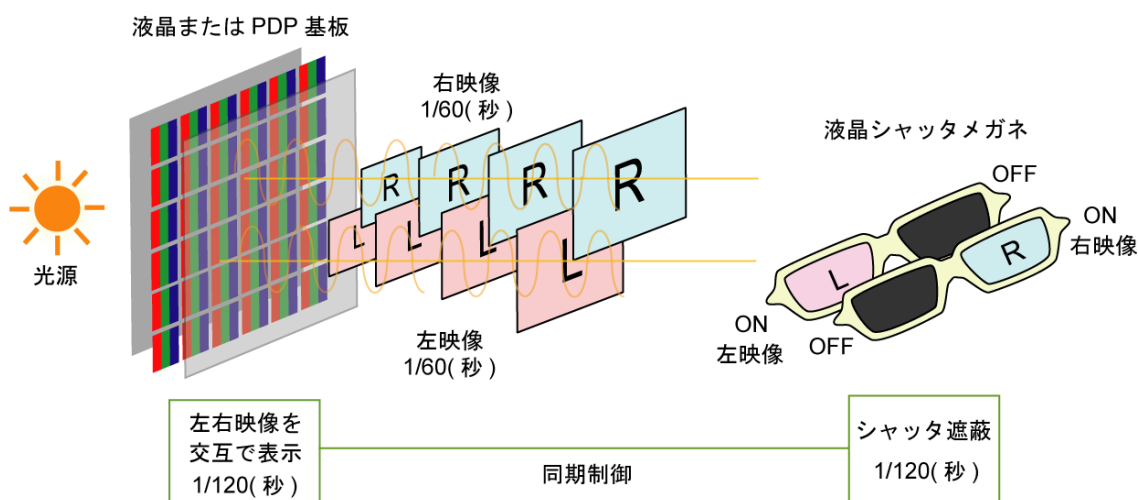



図 4.1　時間多重方式を用いた 3D テレビの原理

（１）フリッカ（Flicker）

時間多重方式の特徴としては、液晶シャッタメガネの電気的な駆動による高速開閉で立体視が可能となる。映像と液晶シャッタによる遮蔽（黒）を時間順次に見せるため、シャッタの切り替え周波数が低いとフリッカが知覚される。フリッカの知覚されない臨界融合周波数（CFF ; Critical Flicker Frequency）は、視環境によって変動することが知られており、眼精疲労の測定によく使用される[15]。立体表示デバイスにかかわる先行研究では、時間多重方式においてシャッタスピードが、単眼では 55Hz、両眼では 110Hz 以上になるとフリッカを知覚しなくなると言われる[16]。また、3D コンソーシアムの安全ガイドラインでは、フリッカの知覚は、視覚疲労の原因となり、場合によっては光感受性発作を誘引する可能性があると報告し、フリッカを軽減するため、液晶シャッタの表示速度をなるべく高速にすることを推奨している[17]。その一方、限界周波数は、眼の状況や疲れの度合いによって変わる可能性があることから、CFF 以上の周波数を持つ立体表示デバイスより発生するフリッカに関して、関連研究が少ないのが現状である。

（２）偽視差（Pseudo Parallax）

時間多重方式の特徴として、SPM で観察すると、視標の動きにより Mach-Dvorak 現象が生じることがあげられる[18]。これは、画面上を水平に移動する 2D 視標を、液晶シャッタメガネを用いて観察することで、本来視差情報が含まれていないにもかかわら

ず、画面の前後に視標が知覚される現象である。視標の条件としては、一定の速度の範囲内で水平方向にゆっくりと運動する必要があり、眼球を同じ速度で追従させる SPM の際に主に知覚されると考えられる。

この現象による視差に関して、立体コンテンツの制作など、立体視の設計時には想定しなかった視差が生じることで、ここでは、偽視差（Pseudo Parallax）と呼ぶことにする。偽視差は、時間要因としては刺激持続時間（ED；Exposure Duration）と眼球間遅延時間（IOD；Interocular Delay）に関連があり、片眼への刺激呈示から、他眼への刺激呈示までの時間（Onset‐Onset）を長くすることにより、視差が増大することと、他眼への刺激呈示時間が 60msec ないし 70msec 秒を超えると、融合して見る事ができなくなることが示唆されている [19]。一方、最近の液晶シャッタメガネは、ED が 8.3msec で短く（120Hz 基準)、他眼への刺激呈示までの時間が液晶の応答速度となる（図 4.2)。

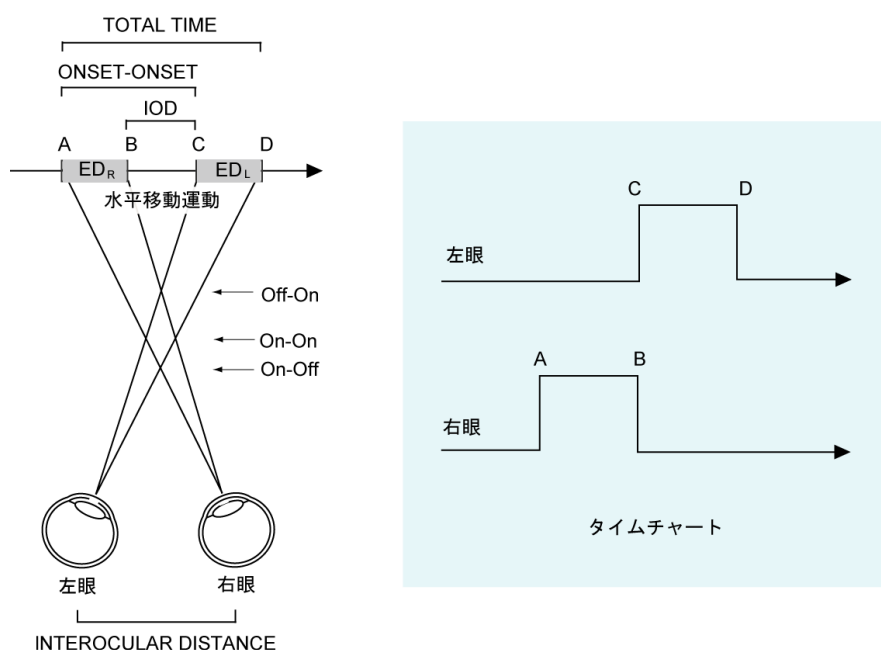



図4.2　時間多重方式における偽視差の知覚[19]とタイムチャート

（３）ファントムアレイ（Phantom Array）

サッケード中には、網膜像も高速に移動するが、周囲が動いたことを知覚することなく、視野の安定性が得られる。サッケードの中に知覚されるはずの不鮮明な網膜像は、サッケード抑制という感度低下により、知覚しにくくなる [20]。サッケード抑制は、ぶ

れた像の抑制にのみ働き、網膜像の移動前後の統合についての働きは得られない。このため、視野の安定性は、サッケード中の網膜像の位置変化を眼球運動情報によって補正されるという相殺説により、得られていると言われる。

視覚的定位は、視野の安定性を得るために働くが、特別な条件下では誤って位置を知覚する。暗中で、サッケードを行っている前後に、強い光を与えると、定位エラーが起こることが知られている。Hershberger は、サッケードの際に、高速に点滅するフリッカ視標を呈示すると、サッケード振幅半分の線列が知覚されることを報告し、これをファントムアレイと呼ぶ [21]。時間多重方式では、液晶シャッタメガネを用いてコントラストの強い視覚刺激を観察した際に、サッケードに伴ってファントムアレイと類似な現象が知覚される。

４．２．３ 空間多重方式

空間多重方式とは、左右映像を光学系に対応するよう配置して同時に表示する方式の総称であり、一つの画面を左右映像用に同時に分けて表示することで、空間分割立体方式とも言う。電気による駆動システムを必要としないメガネを用いることで、パッシブ方式（Passive Glasses）とも呼ばれる。本研究で対象とする空間多重方式は、Xpol（エックスポール）を利用したディスプレイが用いられた。Xpol とは、μPol（マイクロポール）[22]を改良した物で、硝子基板と液晶ポリマー（Liquid Crystal Polymer）等からなる微細パターニング位相差板で構成された透明フィルムである [23]。Xpol は、液晶パネルの水平ラインピッチに合わせて位相差板を設計し、1 ラインごとに光の回転方向を変える役割をする。液晶パネルの表面には偏光板が貼られており、光は直線偏光として投射される。特徴として、Xpol は、1/4 波長板の機能を持っており、透過した光は、奇数列には左回り円偏光として、偶数列は右回り円偏光として表示される。立体視する際には、左右の偏光の方向が異なるメガネをかけ、左眼に奇数列の映像を、右眼には偶数列の映像光を表示させることにより、左右映像を多重化表示することが可能となる。円偏光を用いる立体表示は、直線偏光を使用した場合に比べ、観察者が顔を傾けても立体視可能となる利点がある（図 4.3)。一方、一つの空間に視差情報を多重化することにより、本来の呈示刺激には含まれてない、以下のような、アーチファクトが知覚される。

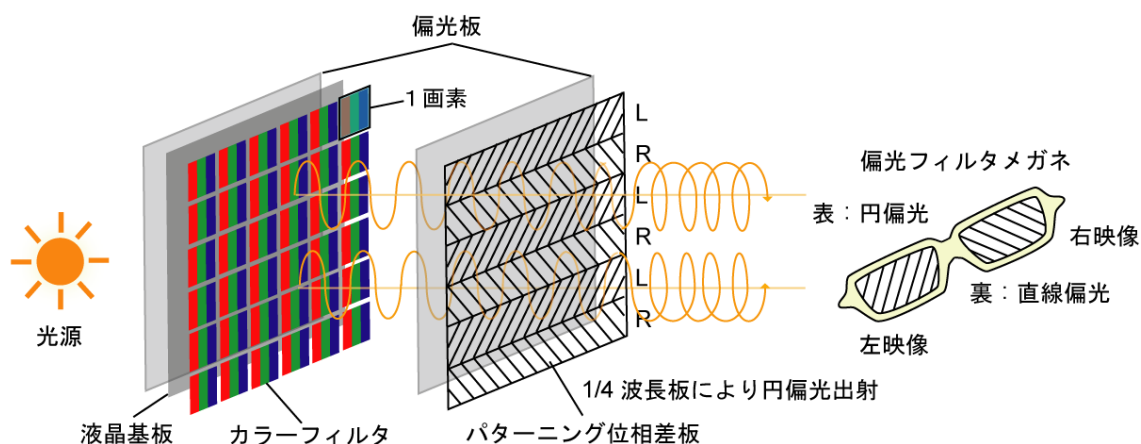



図4.3　空間多重方式を用いた3Dテレビの原理

（１）視野闘争（Binocular Rivalry）

空間多重方式では、左右眼に類似した刺激を表示する場合、左右眼像は融合しやすく、安定した立体映像が得られる。一方、垂直方向の情報量が少ない映像の場合、立体映像として融合しづらくなり、視野闘争が生じる。視野闘争は、両眼情報に大きい差異がある状態での不安定な見え方を意味し、立体視に影響を与え、視覚疲労の一因にもなる [24)]。たとえば、空間多重方式に、ピクセル単位で描画された線を立体映像として表示すると、場合によっては奇数と偶数ラインの情報が異なることによって、視野闘争によるチラつきを知覚する。また、小さい文字で構成された 2D 視標を、空間多重化で立体視する場合も、水平 1 ラインごとに左右映像を分離して知覚するため、視野闘争が生じる。

（２）偽視差（Pseudo Parallax）

現行の放送用のテレビ方式において、放送電波の有効利用やメディアの費用対効果を高めるため、インタレース走査を採用し、動画データの記録および表示が行われている。インタレース走査は、飛び越し走査とも言われ、画面を奇数と偶数ライン（フィールド）に分け、時間順次に記録・または再生する方式である。インタレース走査による動画データを FPD に表示する際には、画質向上やちらつきを防止するため、二つのフィールドを一つのフレームとして表示する、I/P 変換（インタレース/プログレッシブ変換）が行われる。動きのない映像の場合、インタレース走査で得られた 2 枚のフィールドには、時間のずれが生じないことで、プログレッシブ走査での 1 枚のフレームと同じ映像が得られる。一方、動きの激しい映像の場合、2 枚のフィールドに時間のずれた映像が記録

される。空間多重方式では、左右の映像が 1 フレームにホールドして表示されるため、インタレース走査で得られた映像を立体映像として表示する場合、再生環境によっては、同一画面の左右の映像にフィールド周期分の時間差が生じる。一例として、水平方向に移動する 2D 視標の映像を、左映像は奇数ラインから、右映像は偶数ラインから取って、立体映像として表示する場合、奥行き情報を持つ映像が知覚される。また、インタレース走査で録画した 2D 視標の映像を、同解像度を持つ空間多重方式ディスプレイに Pixel by Pixel で表示する場合にも、奥行き情報が知覚される。本研究では、インタレースによる視差を、本来表示されないはずの両眼視差という意味で、Mach-Dvorak 現象と併せ、偽視差と呼称する。

（３）解像度低下（Reduced Spatial Resolution）

空間多重方式では、水平 1 ラインごとに左右の映像を表示するため、垂直方向の情報量が半分となり、垂直解像度の低下につながる可能性がある。表示デバイスにおける解像度とは、画面表示に用いられる総画素数を表し、コンテンツの高精細な表現の際、画質の重要な要因となる。空間多重方式では、表示デバイスの 1 画素と位相差板の 1 ラインが縦方向に常に同じサイズとなり、メガネに通した映像には、水平 1 ラインごとの映像と、次の 1 ラインごとの遮蔽された映像（黒）が表示される。結果的に、面積あたりに表示される映像が半分となり、さらに 1 ラインごとに黒が表示されることによって、解像度低下が考えられるが、こうした、解像度低下に関する研究は、少ないのが現状である。

４．３　立体表示デバイスにおける表示方式の生体影響

４．３．１ 本実験の目的

時間および空間多重方式は、限られた時空間の中に、左右映像による立体映像を表示するため、多重化による立体表示を行う。そのため、第 4 章 2 節 2 項と 3 項で述べたように、解像度の低下や、本来の映像には含まれていない、アーチファクトが知覚される。これらは、視環境によって発生条件が異なり、刺激呈示と眼球運動を調べることで、生体への影響が明らかになる。また、表示方式についての基礎的な知見を得ることから、デバイスの安全かつ快適に活用が可能となる。本実験は、デバイスの表示方式に起因す

る、アーチファクトの発生条件を明らかにし、それらが映像酔いや眼精疲労といった生体への影響や立体感に対する影響を調べることを目的とする。

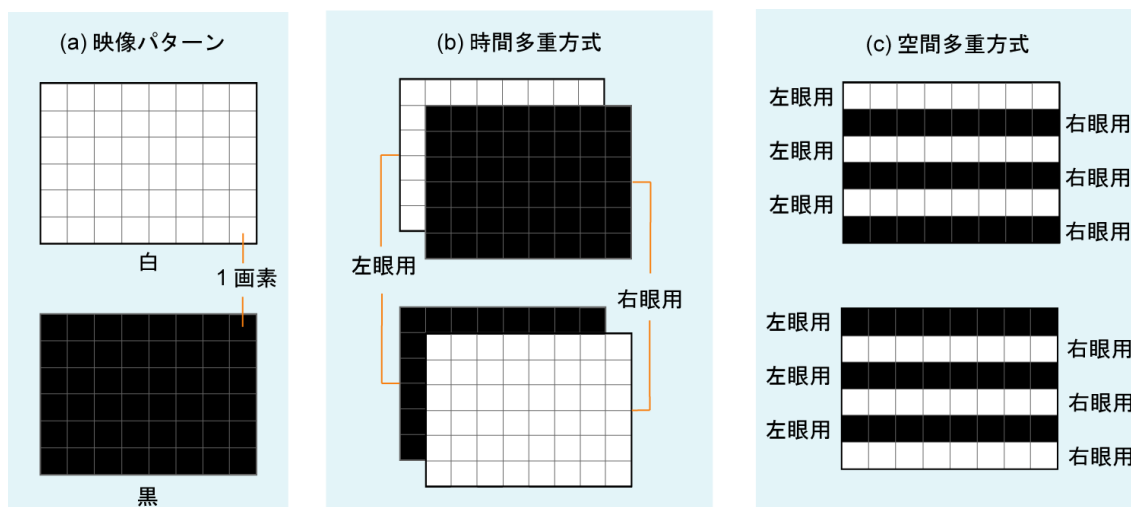
４．３．２ 実験方法

（１）表示デバイスの検討

実験用デバイスには、市販のディスプレイを対象に、表示方式ごとに同サイズ（22インチ）、同解像度（1680×1050 pixel）のディスプレイを用いた。時間多重方式には、液晶モニター（SAMSUNG、2233RZ SyncMaster）と液晶シャッタメガネ（NVIDIA、3D Vision）および赤外線エミッタを用いた。モニターのリフレッシュレートは 120 Hz であり、液晶シャッタの遮蔽速度もそれに同期するように設定した（単眼 60 Hz)。空間多重方式は、Xpol の貼り付けた液晶モニター（HYUNDAI IT、W220S）と円偏光フィルタメガネを用いた。モニターのリフレッシュレートは 60 Hz であった。

実験を行う前に、各デバイスに関する特性を把握するため、輝度差によるクロストーク率と融合幅を測定した。

（２）クロストーク（Cross Talk）

クロストークとは、両眼立体視の際に、左右それぞれの視認空間から見える画像における左右視差画像の混在の程度を示し、安全かつ快適な立体視を得るための重要な要因となる [25)]。測定方法に関しては、表示方式ごとに光学特性が異なるため、評価方法も並びに規格などについても現状はまだ、標準として定められていない状況である。今回は、空間多重方式でのクロストークの測定に主に使われる、視認空間から見える視差画像の輝度差を両眼で測定を行い、光の漏れ量をクロストーク率として表した。この測定方法では、一般に、画面に全白パターンを出す際の輝度と、左右の映像として白と黒パターンを映し出し、それぞれ偏光メガネを通した輝度の比率で表す [26)]。今回は、両方式を対象に測定を行うため、画面に白パターンを出す際のクロストーク率に加え、黒パターンを呈示する際の輝度差によるクロストーク率を計測した（図 4.4)。輝度の測定には輝度計（コニカミノルタ、LS-110）を用い、計測は暗室で行った。

白パターン基準：100－（(白黒に構成された立体映像（b または c）÷ 白パターン）×100）

黒パターン基準：（黒パターン ÷ 白黒に構成された立体映像（b または c)） × 100

図 4.4　クロストーク測定方法

計測の結果、時間多重方式の場合、輝度の高低に関係なく、一定のクロストーク率が得られたが、空間多重方式の場合、輝度の低いパターンを背景に、高いパターンを呈示する場合、クロストーク率が高く測定された。これは、空間多重方式を用いるデバイスが、パターニング位相差板と偏光メガネで構成されており、デバイスの特性上、高輝度色の漏れ量がクロストーク率に影響を与えたと考えられる。また、両方の表示デバイスともに、両眼のクロストーク率が少し異なっており、今後の課題として考えられる。その結果を表 4.1 に示す。

表 4.1　両眼におけるクロストーク率

表示デバイス	基準色	クロストーク率（%）	
		左眼	右眼
時間多重方式	白	19.53	20.06
	黒	16.67	17.39
空間多重方式	白	8.35	9.18
	黒	28.00	26.92

（３）融像幅の測定

融像幅とは、輻湊および開散運動による融像限界点の間隔の幅を意味し、立体表示デバイスにおける視機能検査の評価指標として用いられる[27)28)]。本章では、左右像が二重像として知覚されている開散の状態から、一定速度で輻湊方向に移動する視標を呈示し、一つの立体像として知覚される時点を測定した。輻湊の状態から開散方向に移動する融像に対しては、予備テストの結果、被験者によっては寄り眼の状態で融像を維持する傾向があり、それによる個人差が大きいことから、今回は測定を行わなかった。

視標は、黒い背景に視覚 1 度を持つ白い長方形を用意し、画面の左端から中央に移動する刺激と、画面の右端から中央に移動する刺激を、左右映像として呈示した。視標の移動速度は、予備実験を通して融像確認が可能となる速度を確認し、0.37 度/s に設定した（図 4.5）。

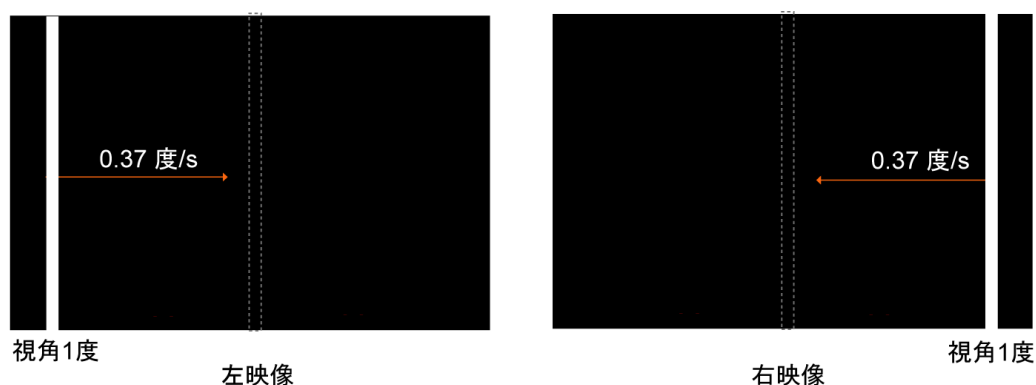



図4.5　融像幅測定に用いた呈示刺激

被験者には、左右映像の視標が、画面上の 1 本の長方形として知覚された瞬間、手元のボタンを押して止めるように指示した。左右映像の視標が停止した際の離れた距離を各表示方式の融像幅として定義した。測定は、本実験と同じ環境で行い、本実験の被験者を対象に、スクリーン面を基準として、浮きと沈み方向でそれぞれ 3 回ずつ実施した。

測定の結果、時間多重方式の方が空間多重方式より浮き方向、沈み方向ともに融像幅が広く、融合しやすいことが分かった（表 4.2）。また、両方式ともに、浮き方向の方が沈み方向より融像幅が大きいことが示された。表示方式別に浮きと沈み方向間での変化で t 検定を行った結果、両方式ともに有意差が表れた（時間多重方式；$t = 2.735$、空間多重方式；$t = 2.728$）（$p < .01$）。

表 4.2　各方式の融像幅（度）

表示デバイス	浮き方向	沈み方向
時間多重方式	0.64	0.42
空間多重方式	0.41	0.25

（４）実験環境

実験は、アーチファクトの発生要因が表示方式ごとに異なることから、表示デバイスごとに個別に実施した。刺激の呈示条件は異なるが、同一視聴環境を使用したため、一致する部分をここで述べる。実験は暗室で行われ、被験者は椅子に着席し、眼の高さがスクリーンの中心となるよう顎台を用いて調整した。視距離は 60cm とし、水平視角が 43 度、垂直視角 27.7 度になるよう設定した。実験環境を図 4.6 に示す。

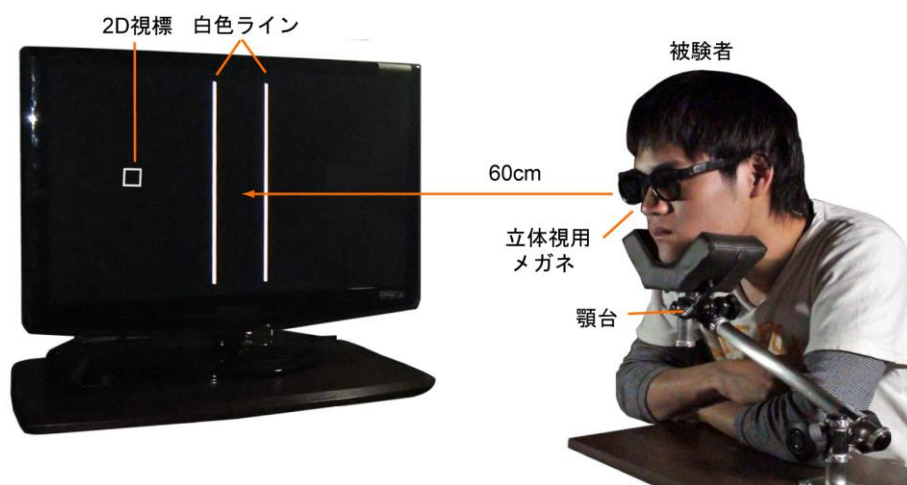



図 4.6　実験環境

（５）呈示刺激

呈示刺激は、第 4 章 2 節 2 項で述べた時間多重方式のアーチファクトを踏まえ、視標の速度と呈示位置を条件に合わせて調整した。呈示刺激としては、アーチファクトの発生種類や頻度が異なる 3 条件と、統制条件としての 2D 映像を 1 条件とし、計 4 条件になるように設定した。視標は視角 1 度の正方形であり、各辺は 1 ピクセルの白線で描画し、画面の中央を基準に水平視角 10 度になる所に配置した。アーチファクトの発生

を促すため、黒い背景に対して水平視角 0.25 度の白色ラインを、画面中心から左右に 5 度離れた位置に表示した（図 4.7)。視標は条件ごとに設定された速度で水平方向に往復運動し、同一画像を左右映像として呈示した。つまり、同じ刺激を左右画像として呈示するため、両眼立体視で得られる映像は、2D 映像となるように設定した。刺激のファイル形式は、追従眼球運動を円滑に誘発するため、59.94p frame/s の MPEG2 に設定した。表示方式ごとにアーチファクトの発生要因が異なるため、各条件に合わせ、視標の形や移動速度、視差に変化を加えた。刺激はすべての条件において 5 分間呈示された。刺激呈示は、すべて同じパソコンを使用し、時間多重方式は NVIDIA Stereoscopic Player を、空間多重方式および 2D 条件では Stereoscopic Player（3dtv.at 社）を用いて呈示を行った。

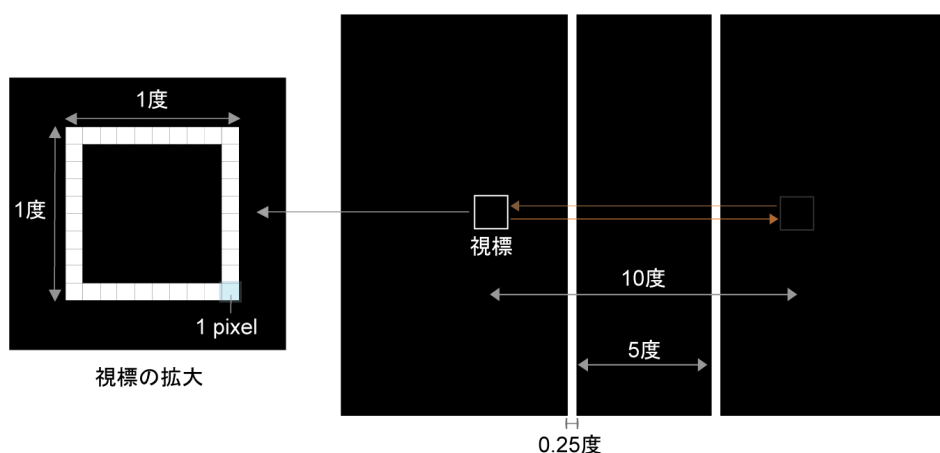



図 4.7　呈示刺激の視角設定

（６）実験条件

① 時間多重方式

実験条件は、アーチファクトの発生が異なる 3 条件と、統制条件としての 2D 映像を 1 条件とし、計 4 条件になるように設定した。条件 1 では、サッケードの生起を意図して、視標の移動速度を 20 度/s と設定した。サッケードにより、偽視差とファントムアレイが顕著に引き起こされ、刺激の見え方に影響を与えることを想定した。また、両眼 120 Hz 以上のフリッカが知覚され、すべてのアーチファクトが発生される条件として設けた。条件 2 では、視標の移動速度を 5 度/s とし、SPM を誘発する刺激を用意した。サッケードの少ない刺激となり、ファントムアレイの軽減や偽視差の見え方にも変化が

あると考えられた。条件 3 では、左右眼で視標の位置が時間差によって異なる場所に知覚されるよう設定した。具体的には、条件 2 の片方の映像を半フレーム分ずらした場所に、視線移動に合わせて順次的に表示する中間フレームにより、偽視差の除去を試みた。それにより、アーチファクトとしてフリッカのみ知覚される条件として設定した。条件 4 は統制条件であり、液晶シャッタメガネを駆動せず、フリッカのない状況として、条件 2 の刺激を呈示した。すべての条件におけるデバイスの輝度は、メガネ着用時に同レベルになるように調整した。

② 空間多重方式

実験条件は、時間多重方式と同様に、アーチファクトの発生が異なる 3 条件と、統制条件としての 2D 映像を 1 条件とし、計 4 条件になるように設定した。視標の移動速度はすべての条件において 5 度/s に設定した。条件 1 では、すべてのアーチファクトの発生を想定し、刺激を用意した。刺激の視標は、まず、視野闘争を誘発するため、左右映像の視標の上辺と底辺をそれぞれ取り除き、立体映像として呈示した（図 4.8）。さらに、偽視差の発生を想定し、インタレースの奇数と偶数のフィールドに再生される映像を左右映像として用意した。また、条件 2 では、視標の欠損を補完し、偽視差のみ発生する刺激を用意した。条件 3 では、さらに偽視差の除去を意図し、プログレッシブ型で表示した。上記の三つの条件に関しては、空間多重化を行うことにより、解像度が低下することを想定した。条件 4 は統制条件であり、メガネ側の偏光フィルタの向きを変えることで、条件 3 の刺激が左右眼に同一となるように、つまり解像度の低下のない状態で呈示した。表示デバイスの輝度は各条件で等しくなるよう調整した。

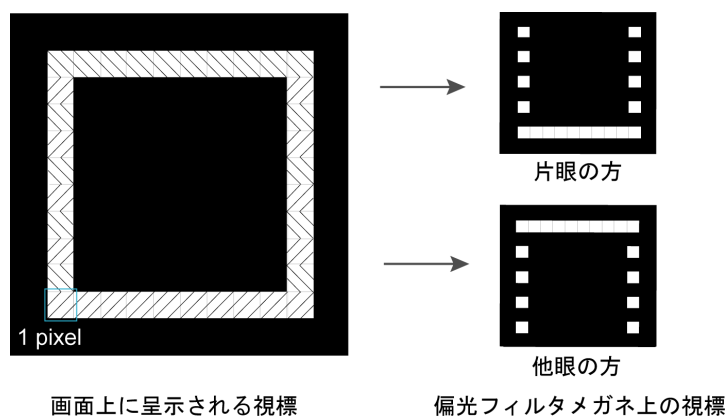



図 4.8　条件 1 における 2D 視標の呈示イメージ（空間多重方式）

（７）実験手順および被験者

刺激呈示前・後に、映像酔いや眼精疲労に関する自覚症状[29)]と視標の立体感について主観評価を行った。自覚症状の調査項目を表 4.3 に示す。被験者は 20～30 代の男女 28 例であり、本実験の主旨や方法を説明し、立体視が可能であることと[30)]、色覚障害のないことを確認してから実験を行った[31)]。

表 4.3　映像酔いや眼精疲労に関する自覚症状項目（28 項目）

No.	項目	No.	項目
1	目が疲れている	15	ものが二重にみえる
2	目が痛い	16	こめかみが痛い
3	目が重くなる	17	後頭部が痛い
4	目がごろごろする	18	眉間が痛い
5	目がしみる	19	頭がぼんやりする
6	目が乾いた感じがする	20	頭が重い
7	涙が出る	21	気分が悪い
8	目がちかちかする	22	吐き気がする
9	目がしょぼしょぼする	23	めまいがする
10	目がかすむ	24	肩が凝る
11	見つめていると像がぼける	25	ふらふらする
12	遠くのものが見づらい	26	全身がだるい
13	近くのものが見づらい	27	眠気がする
14	目が熱い	28	首が痛い

４．３．３ 結果と考察

（１）時間多重方式

まず､映像酔いや眼精疲労に関する自覚症状は､刺激呈示前後に 7 件法で回答を求め、呈示前の評点をベースラインとした変化率に変換して解析した。0 を基準とし、プラス方向は負担の増加を、マイナス方向は負担の軽減を表す。Mauchly の球面性検定の結果、球面性が仮定できないので、Greenhouse-Geisser のイプシロン（ε）による自由度

の修正を行って分散分析を行った。変化率をもとに、28 項目と条件間の変化について被験者内 2 要因分散分析を行ったところ、項目（$F = 8.900$、$p < .001$）と条件（$F = 8.772$、$p < .001$）の主効果がそれぞれ有意であった。これは呈示刺激について、項目ごとの変化率が異なることを意味し、また呈示刺激による条件の設定が妥当であったことを示している。さらに、項目と条件の交互作用に有意差が認められ（$F = 4.416$、$p < .001$）、項目の変化率は、呈示刺激による条件設定により異なる可能性が示された。

下位検定の結果、条件 1 が他の条件よりも有意に上昇率が高いことが分かった。条件 1 における、眼精疲労にかかわる症状項目の有意な上昇の要因として、サッケードにより追従する際に生起されるファントムアレイが関与していると考えられる。条件 1 の視標は、移動速度が 20 度/s と他の刺激と比べく高速となり、SPM では追いきれなくなり、時々サッケードが混入したと思われる。なお、刺激呈示後の内省報告から「視線を移動した際に、白いラインの残像が見えた」といった、ファントムアレイの生起に関する意見が多数確認された。また、ファントムアレイとともに、偽視差やフリッカといった複数のアーチファクトを同時に知覚することによる影響も考えられる。一方、今回の実験条件においては、フリッカの発生する条件 2 および 3 と、フリッカのない条件 4 との間に、映像酔いや眼精疲労の自覚症状に対する有意な差が見られなかったことから、液晶シャッタメガネのフリッカの影響は、ほとんどみられなかったと考えられる。図 4.9 に映像酔いや眼精疲労に関する自覚症状の平均変化率を示す。

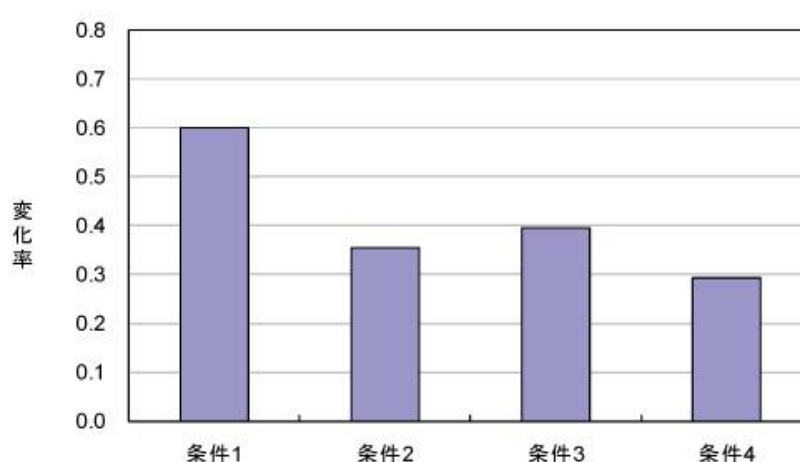



図4.9　映像酔いや眼精疲労の自覚症状の平均変化率（時間多重方式）

また、下位検定として、項目の各水準における条件の単純主効果を分析した結果(Bonferroni 法)、「目が疲れている」、「目が痛い」、「目が重くなる」、「目がちかちかする」、「目がしょぼしょぼする」の 5 項目に有意差が表れた($p < .05$)。項目「目が疲れている」は、条件 1 とすべての条件に対して有意差が認められた（$p < .001$）。項目「目が痛い」は、条件 1 と条件 2（$p < .01$）、条件 3、条件 4（$p < .001$）に対していずれも有意差が表れた。「目が重くなる」は条件 1 と条件 4 との間に（$p < .001$）、条件 2 と条件 4、条件 3 と条件 4（$p < .01$）に対して有意差が認められた。項目「目がちかちかする」は、条件 1 と条件 2、条件 3（$p < .05$）、条件 4（$p < .001$）に対していずれも有意差が表れた。項目「目がしょぼしょぼする」においては、条件 1 と条件 4 に有意差が認められた（$p < .01$）。主な自覚症状の変化率を、図 4.10 に示した。

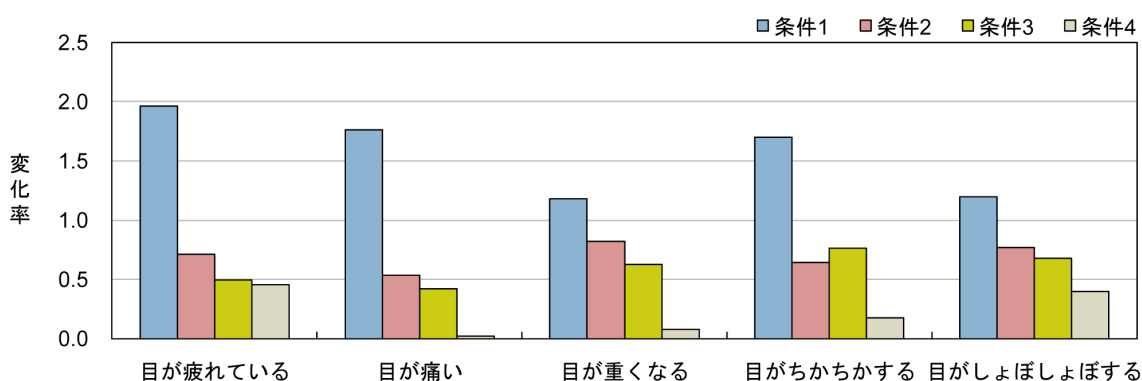



図 4.10　主な自覚症状の平均変化率（時間多重方式）

次に、2D 視標の立体感については、画面からの浮き・沈みの印象について、刺激呈示後に 5 件法で回答を求めた。得点をもとに、各条件に対する 1 要因の分散分析を行った結果、主効果が認められた（$F = 86.073$、$p < .001$）。下位検定の結果、条件 3 と 4 に比べて、条件 1 と 2 の立体感が有意に高いことが分かった（図 4.11）。2D 視標の立体感の結果と併せて考察すると、Mach-Dvorak 現象による、本来表示されない視差情報の関与も否定できない。なお、条件 1 の方が条件 2 より、有意に高い結果となり、視標の速度が視差情報に影響を与える結果が表れた。また、条件 3 と条件 4 の間には、有意な差が表れておらず、Mach-Dvorak 現象による視差情報は、中間フレームの呈示により除去されることが示された。

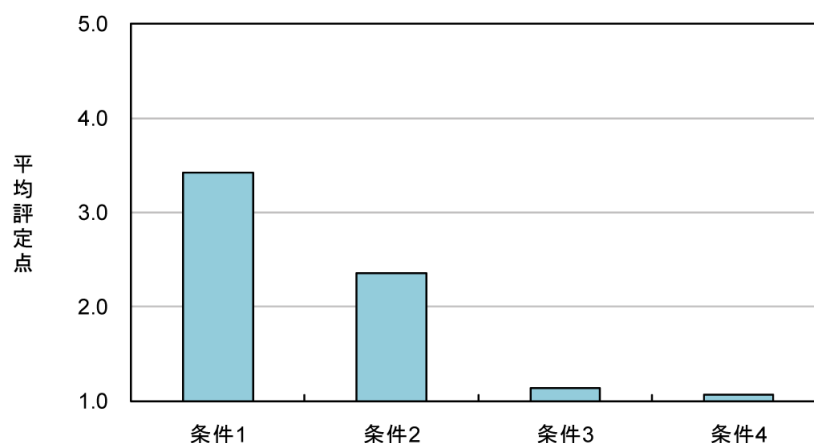



図 4.11　2D 視標に対する立体感の平均評定点（時間多重方式）

（２）空間多重方式

映像酔いや眼精疲労に関する自覚症状は、時間多重方式と同様、刺激呈示前後に 7 件法で回答を求め、呈示前の評点をベースラインとした変化率に変換して解析した。変化率をもとに、28 項目と条件間の変化について被験者内 2 要因分散分析を行ったところ、項目（$F = 7.492$、$p < .001$）と条件（$F = 11.371$、$p < .001$）の主効果が認められた。さらに、項目と条件の交互作用に有意差が認められ（$F = 2.980$、$p < .01$）、項目の変化率は、呈示刺激による条件設定により異なる可能性が示された。

下位検定の結果、条件 1 の方が他の条件よりも有意に上昇率が高いことが分かった（図 4.12）。条件 1 は、条件 2（$p < .05$）、条件 3、条件 4（$p < .01$）の間に有意差が表れた。条件 1 における、眼精疲労にかかわる症状項目の有意な上昇の要因として、左右眼で異なった視標の欠損による視野闘争が関与していると考えられた。なお、刺激呈示後の内省報告において、条件 1 では最も眼精疲労に関する記述が多く、視標のちらつきが気になったという視野闘争に関する意見も多かった。また、時間多重方式の実験結果と同様、複数のアーチファクトを同時に知覚することによる影響も考えられる。その一方、偽視差の有無により、設定された条件 1 と 2 の変化率に有意差がなかったことから、一定範囲の速度以内の刺激であれば、映像酔いや眼精疲労に対する影響は少ないことが示された。なお、条件 2 および 3 と条件 4 の変化率に有意差が認められなかったことから、解像度低下による映像酔いや眼精疲労への影響は、ほとんど見られなかったと考えられる。

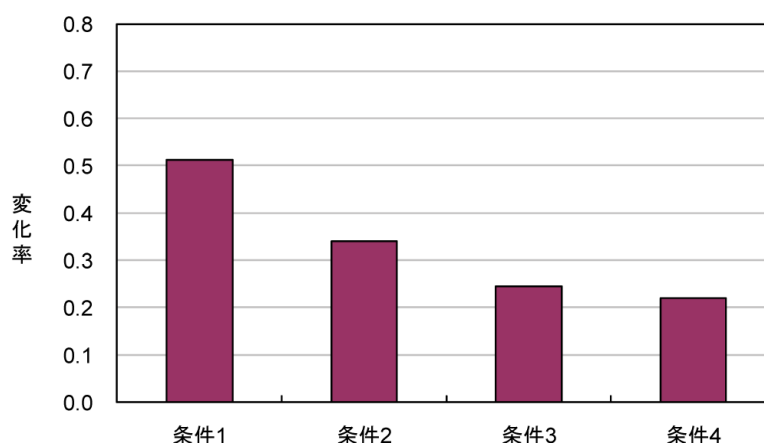



図4.12 映像酔いや眼精疲労の自覚症状の平均変化率（空間多重方式）

下位検定として、項目の各水準における条件の単純主効果を分析した結果（Bonferroni 法)、「目が疲れている」、「目が痛い」、「目が重くなる」、「涙が出る」、「目がちかちかする」、「頭がぼんやりする」、「首が痛い」の 7 項目に有意差が表れた ($p < .05$)。項目「目が疲れている」は、条件 1 に対してすべての条件間に有意差が表れた ($p < .001$)。その他、条件 4 においては、条件 2 と条件 3 との間にとの間に有意差が認められた（$p < .05$)。項目「目が痛い」は条件 1 と条件 2 の間に有意な傾向（$p < .1$）が表れ、条件 3（$p < .01$）および条件 4（$p < .01$）の間に有意差が表れた。項目「目が重くなる」は、条件 1 と条件 3（$p < .05$)、条件 4（$p < .01$）との間に有意差が、条件 1 と条件 3 の間に有意な傾向（$p < .1$）が表れた。また、条件 4 においては、条件 2 と条件 3 との間にとの間に有意差が認められた（$p < .05$)。項目「涙が出る」は条件 1 と条件 3 の間に有意差が表れた（$p < .05$)。項目「目がちかちかする」は、条件 1 と条件 2（$p < .05$)、条件 3、条件 4（$p < .01$）のいずれに対して有意差が表れた。項目「頭がぼんやりする」、「首が痛い」は条件 1 と 4 の間で、それぞれ有意差が認められた（$p < .05$)。

「目が疲れている」、「目が痛い」、「目が重くなる」、「眼がちかちかする」の項目は、時間多重方式によるアーチファクトでも、有意に上昇しており、条件 1 の変化率がすべての条件においてもっとも高い結果を示している。その一方、「涙が出る」は、条件 1 と条件 2 の間に有意差が表れてないことから、アーチファクトの発生の他、別の影響によるものと推察される。また、「頭がぼんやりする」、「首が痛い」の項目は、「刺激の単調な動きにより眠気が生じた」などの内省報告により、単純刺激による影響が結果に表れたと思われる。図 4.13 に、眼精疲労と関連のある項目の平均変化率を示した。

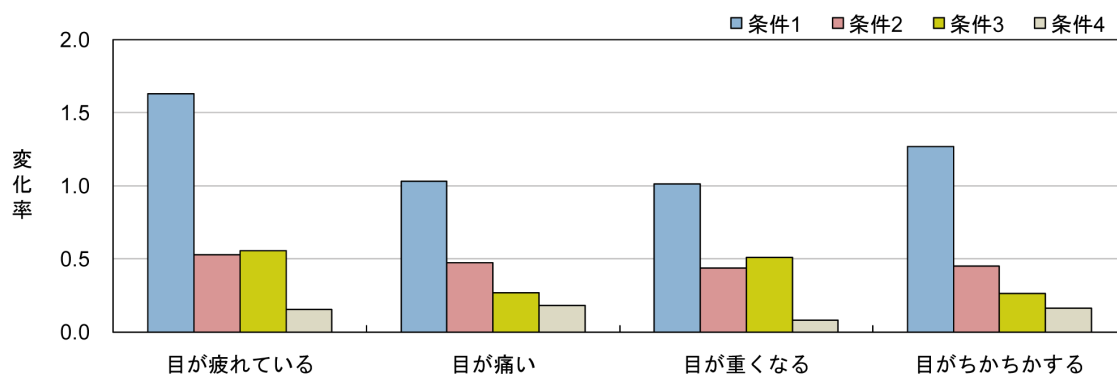



図4.13　眼精疲労の自覚症状の結果（4項目）

次に、2D 視標の立体感は、画面からの浮き・沈みの印象について、刺激呈示後に 5 件法で回答を求めた。得点をもとに、各条件に対して 1 要因の分散分析を行った結果、主効果が認められた（$F = 32.229$、$p < .001$）。下位検定の結果、条件 1 と条件 2 の間には有意な傾向（$p < .1$）が、条件 1 と条件 3、条件 4 に対しては、それぞれ有意差が表れた（$p < .001$）。立体感の結果を、図 4.14 に示す。条件 1 と 2 の立体感が有意に高いことから、インタレース走査による動画データを、各フィールドを左右映像として呈示する場合、本来表示されない視差情報が表れる可能性が示唆された。その他、条件 1 と 2 の立体感の差は、輝度闘争が奥行き知覚を生み出すという、Sieve Effect に起因するものと考えられた [32]。なお、この偽視差は、プログレッシブ型の表示により除去されることが分かった。

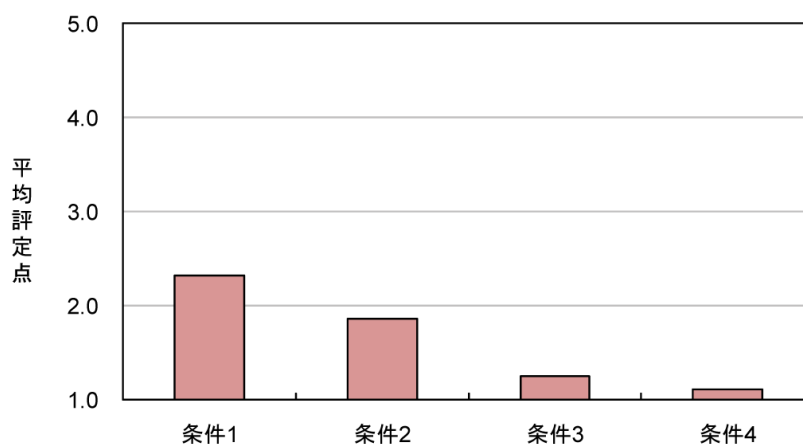



図4.14　2D視標の立体感の平均評定点（空間多重方式）

４．４　まとめ

本章では、立体表示デバイスにおける表示方式の特性や、生体影響について、実験的な検討を行った。その結果、表示方式の特性に起因するアーチファクトの発生条件や、それによる生体影響として、映像酔いや視覚負担および立体感への変化について、基礎的な知見を得た。本章のまとめを次のように述べる。

・時間または空間多重化による表示方法は、既存の FPD 技術を有効に活用することで、簡単に立体表示が可能となる反面、表示効率とのトレードオフとして表示方式の時空間特性によるアーチファクトが生じる。

・時間多重方式において、サッケードを引き起こす高速な視標の移動速度と、それによって生起されるファントムアレイが、眼精疲労の上昇率に影響を及ぼし得る。

・Mach-Dvorak 現象による本来表示されない視差情報の付加が、立体感を上昇させる要因となり、眼精疲労の結果と合わせて考察すると、偽視差の強度が自覚症状の上昇に影響を及ぼし得る。こうした、偽視差の視差情報は、視線移動に合わせて順次的に呈示する中間フレームにより、除去が可能となる。

・時間多重方式において、眼精疲労の自覚症状にフリッカの影響はほとんど表れなかった。

・空間多重方式において、左右眼で異なった視標を認知することで生じる視野闘争が、眼精疲労および立体感を上昇させる要因である可能性がある。

・空間多重方式において、インタレース型表示に起因する視差情報の付加が、立体感に影響を与える可能性があり、こうした偽視差の発生は、プログレッシブ型の表示により除去されることが可能である。

・空間多重方式において、解像度の低下による生体への影響は、見られなかった。

結果から、方式ごとに異なるアーチファクトを確認し、それらの有無による眼精疲労、立体感への影響を検討することができた。表示方式の時空間特性に起因するアーチファクトの生成条件を理解し、視環境を工夫することにより、生体に与える望ましくない影響を軽減する可能性が示唆された。一方で、個々のアーチファクトの強度と生体影響との関連といった、より詳細な分析が、今後の課題として残されている。今後は、これらの結果を踏まえて、生理指標を用いたアーチファクトの生体影響や 3D コンテンツの利用、実際の利用場面を考慮した検討が望まれる。

参考文献

1) 岡野文男 : “立体映像システム, 立体映像技術の研究動向”, 映像情報メディア学会誌, 61(5), pp. 612-613 (2007)
2) R. Engle : “Beowulf 3D: a case study”, Proc. SPIE, 6803, 68030R (2008)
3) R. Neuman : “Bolt 3D: a case study”, Proc. SPIE, 7237, 72370F (2009)
4) T. H. Turner : “Case study: Beauty and the Beast 3D: benefits of 3D viewing for 2D to 3D conversion”, Proc. SPIE, 7524, 75240B (2010)
5) RealD : http://www.reald.com/Content/RealD-3D-In-Theatres.aspx (2010)
6) XPAND : http://www.xpandcinema.com/ (2010)
7) Dolby Laboratories, Inc. : http://www.dolby.co.jp/consumer/motion_picture/dolby_3d_digital_cinema.html (2010)
8) パナソニック株式会社 : http://3d.panasonic.net (2010)
9) ソニー株式会社 : http://www.sony.co.jp/united/3D/ (2010)
10) Samsung Electronics Co., Ltd. : http://www.samsung.com/sec/consumer/tv-video/3d-products/3d-tv/UN55C8000XF/index.idx?pagetype=prd_detail (2010)
11) Siegmund Pastoor, Matthias Wöpking : “3-D displays: A review of current technologies”, Displays, 17(2), pp. 100-110 (1997)
12) 河合隆史，盛川浩志，太田啓路，阿部信明 : “3D 立体映像表現の基礎-基本原理から制作技術まで”，オーム社，pp. 26 (2010)

13) A. J. Woods, A. Sehic：“The compatibility of LCD TVs with time-sequential stereoscopic 3D visualization”, Proc. SPIE, 7237, 72370O (2009)

14) A. J. Woods, K. S. Karvinen：“The compatibility of consumer plasma displays with time-sequential stereoscopic 3D visualization”, Proc. SPIE, 6803, 68030X (2008)

15) 岩崎常人：“眼精疲労の測定方法と評価-CFF と AA-1”，眼科，51(4)，pp．387-395 (2009)

16) 磯野春雄，安田稔：“時分割立体視の成立条件”，テレビジョン学会誌，41(6)，pp．549-555 (1987)

17) 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会：“人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン(2010 年 4 月 20 日改訂、国際ガイドライン ISOIWA 準拠)”，pp．40 (2010)

18) G. S. Harker：“The Mach-Dvorak phenomenon and binocular fusion of moving stimuli”, Vision Rresearch, 13, 1041-1058 (1973)

19) C. F. Michaels, C. Carello, B. Shapiro, C. Steitz：“An onset to onset rule for binocular integration in the Mach-Dvorak illusion”, Vision Research, 17, pp. 1107-1113 (1977)

20) S. Mateev：“Saccadic eye movements and localization of visual stimuli”, Perception and Psychophysics, 24(3), pp. 215-224 (1978)

21) W. A. Hershberger：“Saccadic eye movements and the perception of visual direction”, Perception & Psychophysics, 41, 35-44 (1987)

22) VRex, Inc.：http://vrex.com/products/micropol.shtml (2010)

23) 松廣憲治：“Xpol®とその 3D-TV への応用”，日本液晶学会誌，14(4)，pp．219-232 (2010)

24) 財団法人機械システム振興協会，財団法人 光産業技術振興協会：“自然な立体視を可能とする空間像の形成に関する調査研究報告書-要旨-”，pp．34 (2008)

25) 結城昭正：“2 眼立体ディスプレイにおける画質への光学特性の影響-3D クロストーク両眼輝度差の影響-”，映像情報メディア学会技術報告，33(16)，pp．25-30 (2009)

26) 葭原義弘：“メガネ式立体視ディスプレイの光学評価-パターニング位相差板を使用したメガネ式立体視ディスプレイ光学評価-”，人間工学，45(特別号)，pp．40-41 (2009)

27) 江本正喜，山之上裕一，奥井誠人，矢野澄男：“立体映像標準チャートの制作-視機能検査チャート”，映像情報メディア学会年次大会講演予稿集，pp．218-219 (1998)

28) 江本正喜, 矢野澄男：“立体画像観視に伴う融像幅の変化”, 映像情報メディア学会誌, 54(9), pp．1298-1304 (2000)

29) 大野さちこ，鵜飼一彦："Head Mounted Display をゲームに使用して生じる動揺病の自覚評価"，映像情報メディア学会誌，54(6)，pp. 887-891 (2000)

30) Stereo fly test, Stereo Optical Co., Inc (2009)

31) S. Ishihara : "Ishihara's Tests for Color Deficiency (Concise Edition)", Kanehara Trading Inc. (2003)

32) I. P. Howard : "Depth from binocular rivalry without spatial disparity", Perception, 24, pp. 67-74 (1995)

第５章　立体表示方式における生体影響の客観評価

５．１　本章の目的

本章の目的は、立体像の再生位置と、時間経過に伴う視覚的な負担や立体感の変化に関する基礎的な検討を行い、立体映像の制作環境における安全性・快適性の評価機能の開発に資する知見を得ることである。立体映像は、2D 映像では得ることのできない臨場感を演出することが可能となり、映画をはじめとするコンテンツビジネスにおいて、次世代メディアとして注目を集めてきた。近年、映画館の 2D および立体映像の上映が可能となる表示デバイスの開発や、ハリウッドを中心とする立体映画の世界的な供給などの要因により、急速かつ本格的に普及しつつある。一例として、立体映像を上映可能なスクリーンは全世界で、2015 年には全体の 20%が立体映像対応になると予測されている [1)]。また、日本での動向を見ると、立体映像対応のディスプレイやブルーレイが発売され、映画館で上映された立体映像が、家庭でも楽しめるようになった。このように、映画館やテーマパークだけでなく、家庭内まで立体映像が普及しており、子どもから大人まで幅広い年齢層の視聴者が使用することが予想される。また、映画やゲームなど長時間使用を想定した立体コンテンツの登場と、既存の映像コンテンツを立体映像に変換するシステムやサービスも加えられ、2D コンテンツと同等の使用時間が予想される。

一方で、立体映像の観察には、視覚系の不整合（輻湊と調節の矛盾）により生じる視覚負担など、2D 映像には存在しない特有の問題が生じる [2)]。こうした不整合に影響を与える要因のなか、定量化が可能なものとして視差角があげられる。視差角とは、画面を注視する際の輻湊角と立体像を注視する際の輻湊角の差を、角度の単位で表したもので、映像の立体感を表す尺度としてとして利用される場合が多い。立体映像の視差角と視覚的な負担との関連については、1990 年前後から関連分野において散見されている。例えば、比留間らは、立体映像観中の被験者の調節応答を赤外線オプトメータで測定し、立体ディスプレイに表示された像を奥行き方向に呈示すると、それに伴って顕著な調節応答が見られ、応答量が眼球の焦点深度と同程度になると、飽和傾向を示し、調節制御系に負担になることを報告した [3)]。また、井上らは、異なる視差角を持つ立体映像を呈示し、眼球運動を測定した結果、視差角が大きくなるにつれ、眼球共同運動崩壊率が増加すること報告し、視差角 1 度以内であれば、視覚系に負担が少ないことを示した [4)]。近年では、3D コンソーシアムによる 3DC ガイドラインにおいても、交差方向の視差角

１度以内を安全性にかかわる許容範囲として提案している[5)]。

これらは、静止画もしくは、一つの場面を対象に視差角の許容範囲を提案しているが、動画像の場合は、時系列的な変化、すなわち観察時間をはじめ、対象の奥行き方向の再生位置の変化量や速度などの要因により、大きく増減することが考えられる。図5.1は、カメラと被験者の両方に動きのある立体映像を対象に、左右映像の対象点間の距離を視差角として算出したものである[6)]。立体映像用のカメラを使用し、被写体を回り込みながら撮影を行っており、また、被写体の女性も紅葉の枝葉部分に手を伸ばすなど、行動を取ることで、時間経過とともに視差角が変化しているのが分かる。

立体表示デバイスの開発および、立体映画の普及により、こうしたダイナミックな立体映像を見る機会はますます増えている。その一方、時間経過とともに変化する立体感が、映像の見え方や、生体に与える影響に関する研究は少ないのが現状である。そこで、本研究では、これらの問題を考慮し、立体映像観察時の、時間経過に伴う視覚的な負担や立体感の変化に関する基礎的な検討を行った。立体映像に起因する眼精疲労の主要因とされる視差量を取り上げ、時間による視差の変化が、生体に与える影響に関する評価実験を行い、立体映像の安全かつ快適な視聴にかかわる、基礎的な知見を得ることを目的とした。

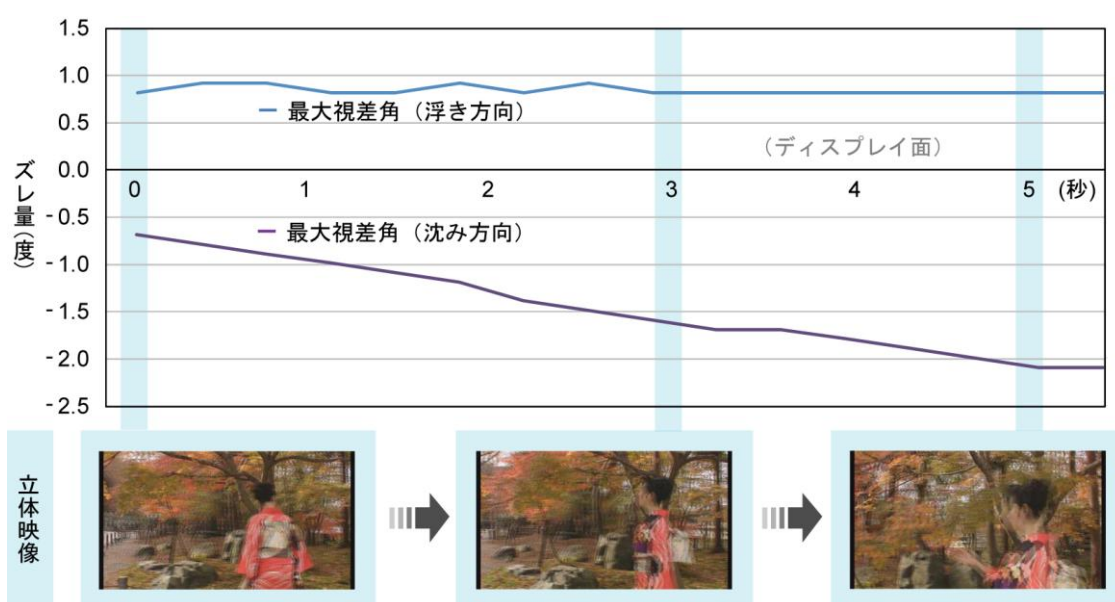



図 5.1　立体映像における時間経過と視差量の変化（画面サイズ 120 インチ、視距離 3H）

５．２　視差変化の評価指標

立体表示デバイス関する評価は、安全と快適の観点から考える必要がある。両眼視差を利用する立体表示デバイスは、左右の眼でそれぞれ左右用の異なる映像を呈示することで、左右の視線が交差する位置に立体映像を再生する。自然視においては、水晶体の調節と輻湊がほぼ一致するのに対して、立体表示デバイス観察時の視覚系は、調節が画像呈示面に働くこと対し、輻湊が再生された場所に働く。立体映像では、観察者が注目している画像の視差量に応じて輻湊が変化する。その故、画面より前方や奥に再現されている立体像は、実際には、画像呈示面に描画されているので、鮮明な映像を得るためには、画像呈示面上に調節を合わせる必要がある。この状態は、自然視の状態と異なることから、視覚系の不整合として、立体映像観察時の眼精疲労の主要因と考えられている [7)-9)]。

また、第 4 章で考察した、表示方式に起因するアーチファクトの発生も、立体表示デバイスにおける視覚負担および立体感への変化に影響を与え得る。その他、立体映像観察時の視環境として、表示画角や画面サイズ、視距離による影響と、両眼情報の不一致として、幾何的な表示画像の差異、明るさの差異、時間・空間周波数の差異、色相の差異、提示時間の差異など、左右映像のひずみがあげられる [10)]。すなわち、デバイス固有の特性に起因する物理要因と、視聴者の感覚から起因する、心理要因および心理物理要因に分けられ、立体映像の見え方や眼精疲労といった生体影響を与える。

立体表示デバイスにおける生体影響を評価する方法としては、被験者の心理的反応に基づく主観評価と、生理的反応に基づく客観評価に分けられる。主観評価の指標としては、第 4 章にも使用された、眼精疲労に関する自覚症状調査表や立体感・見え方に関するアンケートなどが用いられ、刺激による心理効果を尺度として表すことが多い。主観評価は、結果の解釈が容易であることや、専門家でなくても使用可能である一方、人間の心理的反応を測定することから、心理や感性が数字および言葉に変わることにより、被験者の間違った主観情報が実験結果に影響を与える可能性がある。こうした主観性を排除するため、視機能検査による生理的反応を用いて、客観性を補完することが多い(表 5.1)。この視機能検査に関しては、最近、新しい方式のデバイスが増加するともに、眼精疲労の発症原因も複雑となることから、疲労の定量化を図るのに極めて重要な指標となる。

表 5.1　眼精疲労の評価に使用される視機能検査 [11]

裸眼視力の低下
屈折度の近視化
調節
調節力の減退
調節時間・速度の遅延
調節近点距離の延長
調節安静位（Dark Focus）の近方シフト
調節微動（微動調節）の変化
輻湊
輻湊幅の減少
輻湊近点の延長
輻湊安静位（Dark Convergence）の近方シフト
瞳孔面積の縮小（縮瞳保持）
涙液減少
フリッカ値低下

その一方、立体映像コンテンツが長時間になることから、立体表示デバイスの使用時間も長くなることが予想され、時間経過と伴う疲労の測定も必要となっている。しかし、表 5.1 の視機能検査は、測定のために測定機器から呈示される視標を注視する努力を払わなければならなく、特殊な装置が必要になる場合もある。そのため、本章では、非接触で、また長時間のコンテンツ呈示実験にも使用可能とする指標として、視機能検査に含まれていない瞬目に注目した。

瞬目は、眼を開けて覚醒しているとき、瞬間的に両眼のまぶたを閉じることを意味し、その回数や分布を解析することで、生理的変化の測定が可能となることから、古くから、生理指標として使用されている。瞬目は、随意性瞬目と、反射性瞬目および自発性瞬目といった不随意性瞬目に分類することができる [12]。本稿では、随意性でなく、外的反射による瞬目の要素がない、自発性瞬目を中心として考察する。自発的瞬目は、一定の時間当たりの回数といった瞬目率によって表示される場合が多く、視環境の条件によってその増減が異なる。一般に、視認性の悪い刺激の提示や、強い照度・輝度など、視環

境が悪くなることで、瞬目率は上昇することが知られている。また、眼の疲れや、サッケードの多発など、眼球運動による影響や、緊張・恐怖など心理的な影響により、上昇することもある。その一方、高い興味を誘発する刺激や、視覚課題の遂行など、集中力が必要になる条件では、低下すると言われる。表 5.2 に視覚情報デバイスの観察時に影響されると考えられる要因と瞬目率への影響を抜粋して示す。

表 5.2　瞬目活動に影響する要因 [13)]

	要因	条件	瞬目率への影響
視環境	視認性	視覚呈示文字の視認性の悪さ	上昇
	照度・輝度	強い照度・輝度	上昇
	視野・視角	広い視角	上昇
物理環境	聴環境	大きな騒音	上昇
	温度・湿度	高温度湿度	上昇
眼球状態変数	視力	弱い視力	上昇
	コンタクトレンズ着用	コンタクトレンズ着用	上昇
	眼科的疾患	眼科的疾患の存在	上昇
	眼の疲れ	目の疲れの増加	上昇
	眼球運動	サッケードの多発	上昇
		垂直運動の増加	上昇
	眼球位置	上方視	上昇
身体状態	覚醒水準	わずかな眠気	上昇
		強い眠気	低下
心理的変数	状態変数	緊張・怒り・恐怖	上昇
		判断の終了	上昇
		高興味刺激の提示	低下
課題	感覚モダリティ	視覚課題の遂行中	低下
	視覚への課題要求	閉眼を抑制する教示	低下
		凝視点の使用	低下
	課題の連続性	不連続、分離試行課題	上昇

表示デバイス観察において、よく使用される瞬目の測定法には、VTR（Video Tape Recording）法、眼球電図（EOG；Electro-Oculography）法があり、それぞれ長所と短所がある。VTR 法は、実験者が被験者の瞬目を、ビデオカメラの記録により測定する方法で、被験者の頭部に測定機器を付けずに、離れた場所から自然な状態で、瞬目観察が可能なメリットがある（図 5.2）。また、記録装置が廉価であり、簡便な装置で資料の収集や処理が可能であることから、実験設備のない場所でも瞬目測定が可能である。短所としては、分析の自動化のために特別な解析ソフトを用いらなければならず、既存の映像編集ソフトで分析する場合には、映像の長さと同等の作業時間と努力が必要となる。

図 5.2　VTR 法による瞬目回数の解析

EOG 法は、眼球の角膜側と網膜側に存在する角膜網膜電位を利用する測定法である。眼球の左右に電極を装着すると、眼球の水平方向の動きの大きさに応じて電極間の電位差が変化する。変化した結果が、横軸を時間と、縦軸を電位差にしたグラフとして表示され、振幅の変化を見て瞬目として判断することが可能となる。その一方、眼の付近に電極を貼り付けるため拘束感が強く、被験者に違和感を与えることや、専用の測定機器が用意されるごとの短所がある。

本章では、立体映像観察時の時間経過にともなう視差量の変化が、生体に与える影響を評価する指標として、瞬目活動の変化を用いることを試みた。瞬目を指標として用い

た研究として、VDT（Visual Display Terminal）作業環境での眼精疲労を評価する実験が多数報告されているが[14)15)]、立体表示デバイスを対象にした実験は少ないのが現状である。その理由としては、従来の立体表示デバイスの場合、クロストークやフリッカなど、技術的な制約に起因する課題が多く、コンテンツおよび表示デバイスの生体影響にかかわる要因が特定できなかったことがあげられる。近年、デバイスの技術進化と同時に、立体映像のコンテンツ制作にかかわるノウハウも蓄積され、立体表示デバイスをめぐる視聴環境が変化してきた。映画の場合、2D 映画と同等の時間に上映するようになり、家庭用の立体表示デバイスもテレビとしての使用を考慮した開発が進んでいる。その故、立体映像観察時において、時間と視差量の変化を要因とし、被験者の自由度が保てる瞬目を指標として用い、生体への影響を測定した。

５．３　立体表示デバイスにおける視差変化の生体影響

５．３．１ 本実験の目的

立体映像は、2D 映像と比べて制作者側で配慮すべき点が多く、視覚負担の度合いという安全性と、適正な立体が感じられるかという快適性の、二つの側面から評価する必要があり、経験の浅い制作者にとって、それらの把握が困難であった。特に、立体映像に画像表示面からの奥行き感を与えるためには、適正な視差量の調整が必要であるが、安全な立体映像の制作理論は、未だ確立されていないのが現状である。

そこで本実験では、立体映像コンテンツの制作・表示における安全性や快適性に関する基礎的な知見を得ることを目的として、立体像の再生位置と、時間経過に伴う視覚的な負担や立体感の変化について実験的な検討を行った。具体的には、時間の変化に伴う視差情報の変化を対象に、眼精疲労の自覚症状調査および立体感に関する主観評価を行った。また、客観評価として、刺激呈示中の瞬目回数を測定し、主観評価の結果と比較・検討を行った。

５．３．２ 実験方法

（１）表示デバイスの検討

視覚刺激を呈示するディスプレイとして、46 インチの液晶ディスプレイ（Hyundai IT、E465S）を用いた。ディスプレイの液晶パネル表面には、パターニング位相差板として

Xpol が貼り合わせられ、内部にはサイドバイサイドの映像をインタリーブの映像に変換するコンバーター機能が装備されている。サイドバイサイドとは、立体映像として用意された左右映像を、横比率が半分になるように圧縮し、既存の映像フォーマットと同一サイズになるように配置した映像で、立体放送に使用されている。サイドバイサイドの映像を、コンバーター機能により、走査線の一本おきに左右映像を交互に配置する、インタリーブ形式に変換し、Xpol と円偏光フィルタメガネにより、空間多重方式で立体表示を行う。今回の実験においても、サイドバイサイド形式の映像を用い、コンバーター機能を用いてインタリーブに変換し、立体表示を行った（図 5.3)。

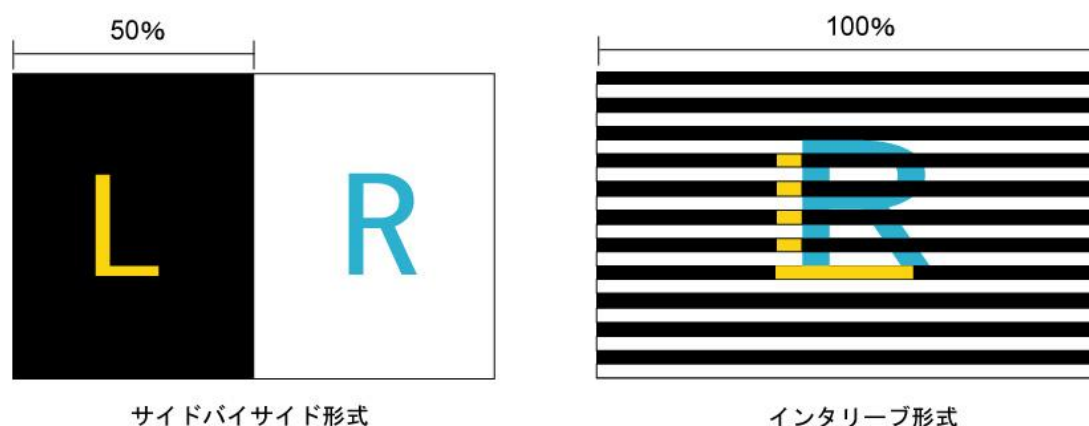



図5.3　立体映像のフォーマット変換

（２）実験環境

実験室は暗幕で遮光し、日本工業規格 C7612 照度測定方法に示された 4 点法による平均照度を計算し、画面中心の高さで 200lux になるよう調整した。部屋の温度は 26℃に設定し、湿度は 45%を維持した。被験者は、ディスプレイに対して中央の位置に配置した椅子に着席し、眼の高さがスクリーンの中心となるよう調整した。そして、被験者の頭部の動きが、実験結果に影響を与えないよう、顎台によって頭部を固定し、円偏光フィルタ付きメガネを装着してディスプレイを観察した。視距離は、ディスプレイの垂直方向の有効画面 57cm の 3H（171cm）に設定した。このときディスプレイの水平視角は約 38 度、垂直視角は約 19 度であった。被験者の瞬目を観察するため、視野に入らない場所にデジタルカメラを設置し、撮影を行った。実験環境を図 5.4 に示す。

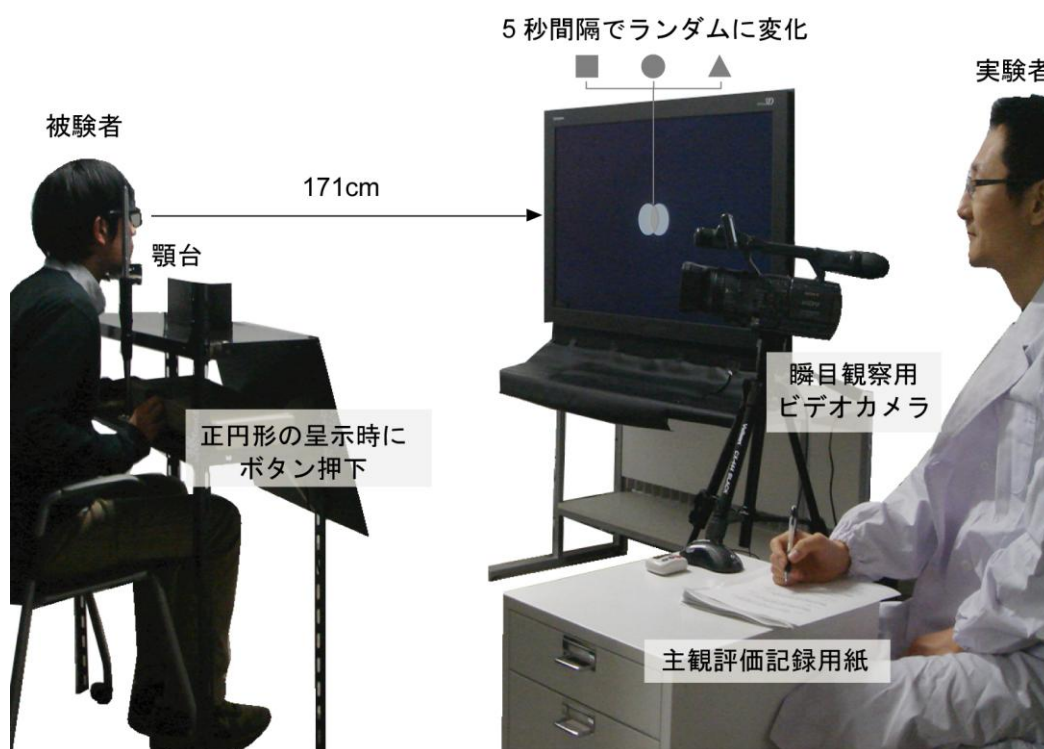



図5.4　実験環境

（３）呈示刺激

呈示刺激として、黒の背景に正方形、正円形、正三角形の図形が視標となる刺激を用意した。各図形の一辺の長さと直径は、水平視角が２度になるように設定した。図形の表示色はクロストークを軽減するため 50%のグレイとした。刺激の呈示は、両眼視差を用いた視差角により設計し、2D 映像の２枚を左右映像としてずらすことで、立体映像として呈示させた。視差角とは、両眼とスクリーン面との輻湊角を基準とし、両眼と左右映像により呈示される立体映像との輻湊角を差し引いた角度を意味する。2D 映像の場合、左右映像がディスプレイ上の同一場所に呈示されるため、視差角は０度となる。視差角がプラスになれば、視標が画面より奥に呈示され、マイナスになると画面より前に呈示される。視標の視差角は、１度（同側方向１度）、０度（2D 映像）、－１度（交差方向１度）、－２度（交差方向２度）の４種類を用意した。図形は５秒間隔でランダムに変化し、被験者には図形の中心を注視すると同時に、正円形が表示された際にボタンを押下するタスクを求めた。本実験における視差角の設定を図 5.5 に示す。

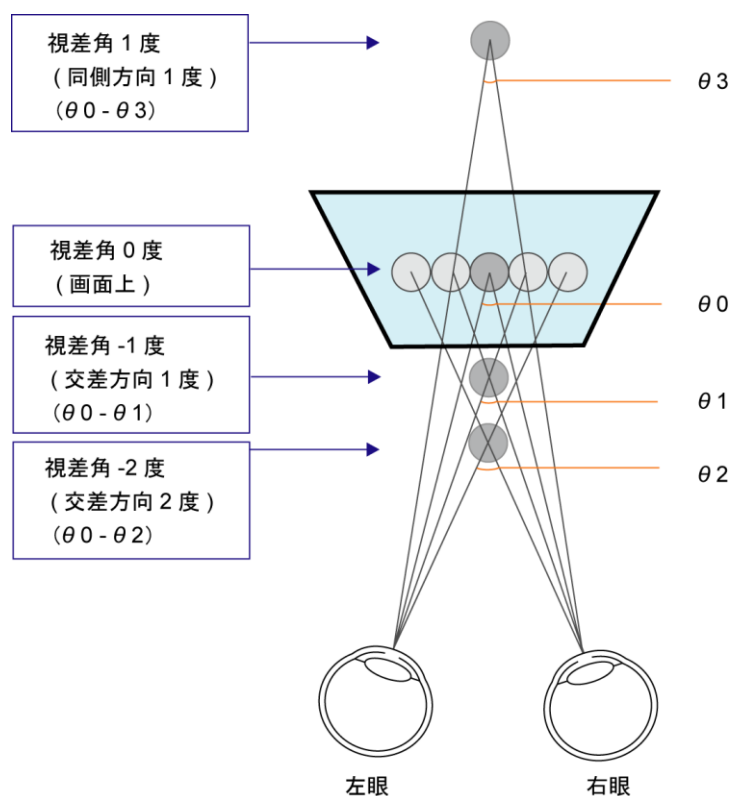



図5.5　実験における視差角の設定

（４）実権条件

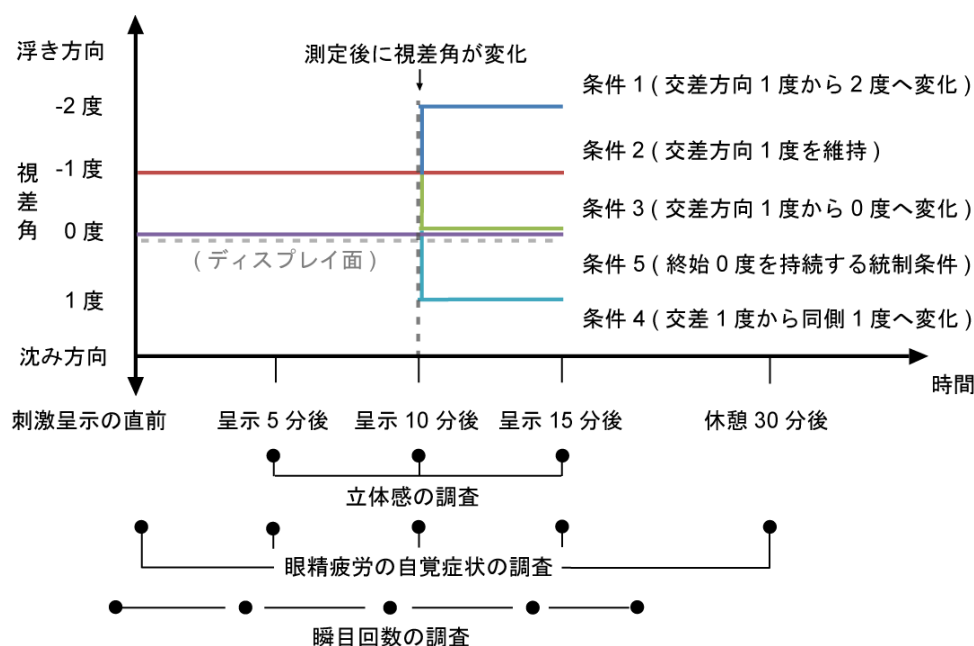
実験条件は、交差方向に 1 度の視差角を有した刺激が、一定時間経過後に 4 種類の視差角に変化する条件と、呈示開始から終了まで 0 度を維持する統制条件からなる、5 種類を設定した。1 度の視差角設定は、快適な立体映像を得る視差条件を交差方向の場合、1 度以内に抑えると見やすいとの先行研究を参考にした [16]。条件 1 は、交差方向 1 度の視差角を有した刺激を 10 分間呈示した後、交差方向 2 度の視差角に変えて 5 分間呈示を行った。条件 2 は、交差方向 1 度の視差角を有した刺激を 15 分間呈示した。条件 3 は、交差方向 1 度の視差角を有した刺激を 10 分間呈示した後、視差 0 度（2D 映像）の視差角に変えて 5 分間呈示を行った。条件 4 は、交差方向 1 度の視差角を有した刺激を 10 分間呈示した後、同側方向 1 度の視差角を持つ刺激を 5 分間呈示した。条件 5 は、統制条件として、0 度の視差角を有した刺激を 15 分間呈示した。

（５）実験手順および被験者

眼精疲労に関する自覚症状の調査は、刺激呈示直前と、5 分後、10 分後、刺激呈示

直後、休憩 30 分後など、5 時点で測定を行った。眼精疲労の自覚症状については、刺激呈示の直前に、被験者が、まったく疲れを感じていないことを確認した上で、試行を開始した。立体感に関する主観調査は、5 分後、10 分後、刺激呈示直後など 3 時点で測定を行った（図 5.6)。刺激観察中にも測定を行うため、被験者が簡単に回答できるよう工夫して設定した。具体的に、眼精疲労に関する質問では、まったく疲れを感じない場合を 1、強く感じる場合を 5 として口頭での回答を求めた。立体感に関しても同様に 5 件法とし、画面からの浮き・沈みについての印象が、立体感をまったく感じないを 1、強く感じる場合を 5 とし、口頭で報告するよう、教示した。

瞬目回数の測定は、デジタルビデオカメラレコーダー（ソニー社、HDR-FX1：30 frames/s、Standard NTSC Signal）を用いて、被検者の座位から 2m 斜め前方より撮影を行った。被検者が瞬目回数の測定を意識することにより、刺激観察中の瞬目回数が変化することを防ぐため、被検者には瞬目回数を測定していることを告げずに測定を行った。瞬目の測定は、被験者が刺激を観察する 3 分前から、刺激呈示 3 分後まで撮影を行った。各条件の実験終了後には、刺激の見え方や眼の状態などに関するインタビューの回答を求めた。被験者は 20～30 歳代の成人 13 例であり、本実験の主旨や方法を説明し、理解・同意のうえ、参加を求めた。被験者には、立体視が可能であることと [17]、色覚障害のないことを確認してから実験を行った [18]。

図 5.6　実験条件と手続き

５．３．３ 結果と考察

（１）眼精疲労の自覚症状

各条件および測定時期における眼精疲労の自覚症状の平均評定点を図 5.7 に示した。すべての条件における平均評定点は、眼精疲労の刺激の呈示前には、まったく疲れを感じていないことで、平均評定値が 1.00 となっている。そして、刺激呈示 5 分間から 10 分間の経過に伴い、すべての条件において自覚症状が上昇している。つまり、視差の有無と関係なく、映像に対して眼精疲労を知覚していることが分かる。そして、その 5 分後には、視差角による差異が顕著になり、条件ことに異なった結果が示された。また、刺激呈示後 30 分間の休憩により、眼精疲労は刺激呈示直前の状態まで回復していることが分かる。

条件 1 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後に 2.23 となり、刺激呈示 15 分後には 3.08 に上昇した。条件 2 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後に 1.92 と上昇し、15 分後には 2.38 になった。条件 3 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後に、条件 1 と同レベルに上昇し、刺激呈示 15 分後には 2.00 と下向した。条件 4 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後に、条件 1 と同レベルに上昇し、刺激呈示 15 分後には 2.26 と上昇した。条件 5 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後に 1.85 と上昇し、刺激呈示 15 分後には 1.92 と緩やかな上昇を見せた。

測定時期および実験条件を要因とした、2 要因の分散分析の結果から、測定時期の主効果に有意差（$F = 39.385$、$p < .01$）が、交互作用に有意差（$F = 2.760$、$p < .01$）が、それぞれ認められた。また、刺激呈示 15 分後における実験条件を要因とした下位検定の結果、条件 1 と条件 3、条件 1 と条件 5 の間に、有意差が認められた（$p < .05$）。その他、条件 1 と条件 2 の間に有意傾向が表れた（$p < .1$）。

条件 1 の刺激条件は、視差角を交差方向 1 度から 2 度に増加させたことから、輻湊と調節の矛盾といった、視覚系の不整合が強調されることが考えられる。また、交差方向 1 度の視差角を持つ刺激を 10 分間呈示することで、眼精疲労が蓄積された上、さらに視覚負担の大きい刺激を観察することにより、眼精疲労の増加につながったと考えられる。その一方、条件 3 は、視差角を 0 度（2D 映像）に変えることにより、眼精疲労の軽減が見られた。視差角 1 度の刺激を 10 分間呈示することで、立体映像の観察により蓄積された眼精疲労が、2D 映像を見ることにより、視覚系の不整合が解消され、軽減につながったと考えられる。すなわち、眼精疲労の時間による変化は、視差角が 0 度

になる頻度と関連がある可能性が示された。条件 2 と条件 4 は、視標の呈示位置が異なるにもかかわらず、眼精疲労の自覚症状に有意差が表れなかった。その結果から、立体映像による眼精疲労は、スクリーン面を基準とし、沈みまたは浮きといった立体映像の再生位置よりも、視差角の絶対値の方に影響されることが考えられる。また、両条件と他条件と有意差が見られなかったことから、15 分間という呈示時間に対して、視差角±1度の立体映像に関しては、2D および 3D の眼精疲労の度合いに有意な差がなかったことが示された。しかし、視差角を交差方向 2 度に増加した条件とも有意差がなかったことから、視差角変化量±1 度以内であれば、2D 映像と同レベルの眼精疲労が生じ、視差角変化量±1 度を超えれば、視差角の増加と伴い、眼精疲労の度合いが 2D 映像と比べ、有意に眼精疲労が生じることが分かった。条件 5 は、15 分間にわたって眼精疲労が段々と上昇したが、条件 1 に対し有意差が表れたことから、時間および視差角の変化により、3D と 2D 条件における眼精疲労の影響は、視差情報の有無によって異なることが示唆された。

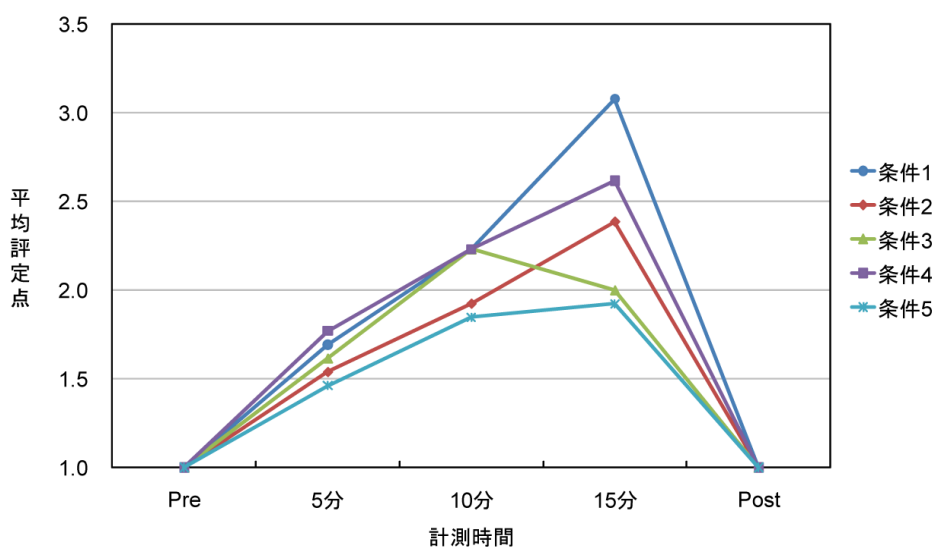



図 5.7　眼精疲労の自覚症状の結果

（２）立体感の主観評価

呈示刺激の立体感の平均評定点を、図 5.8 に示した。この図から、視差角に応じた立体感が知覚されていることが分かる。同時に、観察中の視差角の変化も、立体感の変化に影響を及ぼしている。条件 1 の平均評定値は、刺激呈示 5 分後に 2.77 となり、10 分

後には 2.85 と少し上昇し、刺激呈示 15 分後には 3.85 に上昇した。条件 2 の平均評定値は、刺激呈示 10 分後まで 3.00 を維持し、刺激呈示 15 分後には 2.92 となった。条件 3 の平均評定値は、刺激呈示 5 分後に 3.31、10 分後に 3.15 となり、刺激呈示 15 分後には 1.00 と大きく下がった。条件 4 の平均評定値は、刺激呈示 5 分後に 3.15 となり、10 分後には 3.54、15 分後には 3.69 となった。条件 5 の平均評定値は、刺激呈示 5 分および 10 分後に同じく 1.08 となり、刺激呈示 15 分後には 1.15 となった。

分散分析の結果から、交互作用（$F = 27.563$、$p < .01$）が認められた。また、刺激呈示 15 分後の実験条件を要因とした下位検定の結果、条件 1 と条件 3（$p < .05$）、条件 3 と条件 4（$p < .01$）、条件 5 とすべての条件との間に有意差が認められた（$p < .001$）。そのほか、条件 2 と条件 3 との間に有意傾向が表れた（$p < .1$）。

条件 1 の刺激条件は、視差角を交差方向に 2 度増加させたことから、2D 映像を視標として取り入れた条件と比べ、立体感が有意に高いことが示唆された。また、立体映像の視差情報を変化した条件間に有意差が表れなかったことから、同じ視差角の変化でも、視差を変化して立体感を与えること、視差をなくして 2D 映像にすることとは、根本的な違いがあることが考えられた。

視差角の変化を考えると、条件 1 の場合、浮き方向へ視差 1 度の変化があり、条件 2 は 0 度、条件 3 は 1 度、条件 4 は、浮きから沈み方向に呈示され、視差 2 度の変化がある。結果として、条件 1 が、条件 3 と有意差が表れ、条件 2 と条件 4 とは有意差がなかったものの、条件の中で一番高い変化を見せた。これは、立体感の知覚は、視差の変化量より、視差角の絶対値に影響されたことを意味する。

条件 5 は、呈示時間 15 分間に 2D 映像を用いたことで、すべての条件に対して立体感の知覚が有意に低い結果が表れた。今回の実験に関しては、視標と背景の輝度差が奥行き知覚に影響を与えることなく、両眼視差が中心として評価されたことが示唆された。

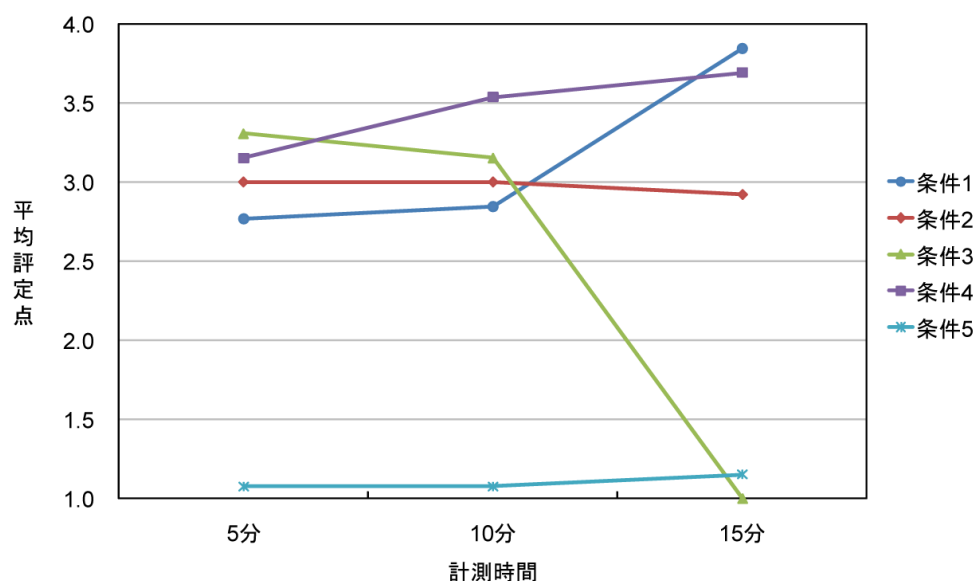



図 5.8　立体感の評価結果

（３）内省報告

実験後の内省報告から、時間の経過と視差角の変化により、眼精疲労の度合いも変わることが示唆された。条件 1 の場合、「飛び出し感が強くて目が疲れた」、「疲れを徐々に感じ、刺激が変わった瞬間、強く感じた」など、視差角の増加が眼精疲労につながる意見が多く聞かれた。条件 2 では、「目が疲れてきて焦点が合わなくなり、立体感も薄くなった」など、時間の経過により、疲れが蓄積されることを示唆する意見が出された。条件 3 では、「立体感がなくなって、眼精疲労がなくなった気がした」、「視差が変わった瞬間、楽になった」など、視差角がなくなることにより、眼精疲労が軽減する意見があった。その一方、「立体感のある方が面白い」など、立体感がなくなることにより、映像の見え方にも影響を与えることが分かった。条件 4 の場合、「目が緊張する疲れがあった」、「視差が変わった時に不快感があった」との意見があり、視差角が浮き方向から沈み方向へ大きく変化することに対して、違和感を訴える意見が多く聞かれた。条件 5 は、「普段のテレビを見るのと同じく、見やすかった」などの意見があった。

（４）瞬目回数

撮影した映像は、動画編集ソフト（Adobe 社、Premiere Pro 2.0）を用い、フレーム単位で、瞬目回数の確認を行った。瞬目として判断する基準は、両眼の上下の瞼が同時

に閉じられるときを 1 カウントと見なした[19]。得られたデータの中、主観評価の質問を行う前の 1 分間を対象とし、刺激呈示前、呈示 3～4 分間、呈示 8～9 分間、呈示 13～14 分間、呈示後、の 5 時点での瞬目を分析の対象とした。

刺激呈示前の瞬目回数は、条件 1 は 37.00±8.67（blinks/min ± SD）で、条件 2 は 35.69±18.27、条件 3 は 30.62±12.80、条件 4 は 34.15±11.23、条件 5 は 35.69±15.57 であった。8 分から 9 分間の瞬目回数は、4 つの条件で上昇が見られ、条件 1 は 29.08±12.43、条件 2 は 31.38±13.78、条件 3 は 27.92±13.45、条件 4 は 25.38±15.01 となった。条件 5 の瞬目回数は、他の条件と異なり、29.31±15.76 と少し減少する傾向が見られた。視差角の変化が行われた、13 分から 14 分間の瞬目回数は、条件 1 は 33.92±14.34、条件 2 は 34.08±15.81、条件 4 は 29.15±17.15 と増加が見られた。その一方、条件 3 の瞬目回数は 26.23±10.96 となり、やや減少した。また、条件 5 に関しては 30.00±11.45 となり、大きな変化は見られなかった。刺激呈示後は、条件 1 は 42.38±15.24、条件 2 は 41.85±13.72、条件 3 は 37.08±9.90、条件 4 は 45.08±17.15、条件 5 は 38.31±14.82 となり、すべての条件に対して増加する傾向が見られた（図 5.9）。

瞬目回数をもとに、時間と条件間の変化について被験者内 2 要因分散分析を行ったところ、条件の主効果に有意傾向が見られ（$F = 2.160$、$p < .1$）、時間の主効果に有意差が表れた（$F = 27.939$、$p < .05$）。また、条件と時間の交互作用に有意な傾向が見られた（$F = 1.633$、$p < .1$）。下位検定として、時間の各水準における条件の単純主効果を分析した結果（Bonferroni 法）、13 分から 14 分間に対して、条件 1 と条件 2（$p < .01$）、条件 2 と条件 4（$p < .05$）に、また、条件 5 とすべての条件との間に有意な差が表れた（$p < .01$）。

13 分から 14 分間の各条件の瞬目回数に対し、視差変化による影響を明確化するため、視差を変える前の瞬目回数を基準とした変化率に変換して条件間の差を調べた。具体的には比較時点の値である 13 分から 14 分間の瞬目回数の値から、基準時点の値である 8 分から 9 分間の瞬目回数のを引き、それをまた、基準時点の値で割った変化率に換算した。条件 1 の瞬目回数は、視差角が 1 度に増加することにより、8 分から 9 分間の瞬目より、14.29%と上昇した。条件 2 では、瞬目回数は、視差角を－1 度に維持することによって、7.90%と上昇した。これらの条件は、立体視標をスクリーン面より、浮き方向に視標を呈示した。条件 4 は、ディスプレイの沈み方向に視標が呈示され、瞬目回数は 12.93%と増加した。これらの結果から、瞬目回数は、視標がスクリーンの沈みまた

は浮き方向といった呈示位置より、視差角の絶対値に影響されるといった、眼精疲労の自覚症状と同じ傾向が見られた。条件 3 の瞬目回数は、立体条件から 2D 条件に変化してから、6.45%と減少した。瞬目回数の増加原因として、一般的に、視認性の悪さや、眼の疲労の増加が要因とされ、減少の要因としては、視覚課題の遂行や、凝視点の使用など集中力を要するタスクなどが上げられる。今回の視標に関しては、画面の中心に呈示される視標を用いることで、視覚課題への集中も考えられるが、その一方、条件によっては立体視を続ける視覚負担も生じる。二つの要因から、視差情報を持つ条件に関しては、立体視を続けることにより、視覚負担となり、瞬目回数の増加につながったと考えられる。また、視差情報を一段、2D 映像に戻した刺激は、視標の見やすい状況となり、集中することにより、瞬目回数が減少になったと考えられる。2D 条件を 15 分間呈示した、条件 5 は、2.31%と増加し、有意に低い変化を見せた。この結果は、瞬目回数の変化は、時間と視差、両方の影響を受けた可能性が考えられる。

瞬目回数の変化は、眼精疲労といった視覚負担だけでなく、不安や緊張などの心理状態に影響されることから、多くの要因が働いたと考えらる。2D 映像と 3D 映像の一番大きな差として、両眼視差による立体視があげられる。今回の実験では、瞬目回数の変化と、眼精疲労の自覚症状の評価がほぼ同じ傾向を示した。また、立体表示デバイスの視聴時の瞬目回数は、輻湊と調節の矛盾といった視覚系の不整合の頻度とともに、条件ごとに異なる結果が表れた。Stern らによると、視覚負担になるタスクを呈示した際、時間経過とともに瞬目回数が変化すると報告している [20]。また、VDT 作業を対象とした評価実験の場合、眼精疲労により、瞬目率が増加にしたことを報告し、疲労測定の指標として使用している [21][22]。今回の実験では、視差の時間による変化により、瞬目率が変化し、眼精疲労の自覚症状が顕著に表れた条件では、瞬目率も増加する結果が表れた。結果より、瞬目率は、立体映像の視聴時に変動する視差情報による眼精疲労を反映する可能性が示された。また、瞬目率を測定することは、立体表示デバイスの視聴時に発生する眼精疲労の有用な指標として、活用することが考えられる。

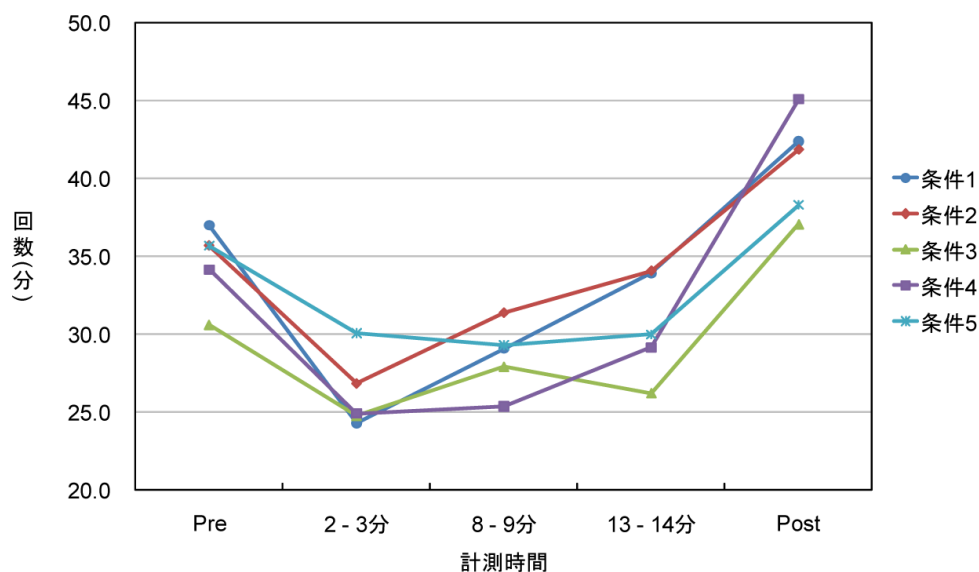



図 5.9　瞬目回数の結果

５．４　まとめ

本章では、立体表示デバイスにおける、時間と伴う視差角の変化が、眼精疲労や立体感の変化に与える生体影響について、実験的な検討を行った。その結果、時間とともに変化する視差角により、視覚負担および立体感の変化に関する基礎的な知見を得た。本章のまとめを次のように述べる。

・立体映像と 2D 映像は、同じ視差を持続する場合、15 分間の単純刺激に対し、一定の眼精疲労が生じる。その疲労感の差異は、一定時間の経過ともに顕著となり、立体映像の方が大きく変化した。

・立体映像は、一定の視差を維持した後、視差角を変化させると、立体感と眼精疲労の度合いに影響を与える。

・立体映像の視差角を一定に維持した後、交差方向（浮き方向）および同側方向（沈み方向）に変化すると立体感が大きくなり、眼精疲労の度合いが高くなる。これにより、立体映像による眼精疲労の度合いは、立体映像の再生位置により、視差角の絶対値に影響される。

・立体映像の視差角を一定に維持した後、2D 映像に変化すると立体感がなくなり、眼精疲労の度合いが低くなる。

・立体映像による眼精疲労の度合いは、交差方向 1 度および同側方向 1 度を基準に、変化する。

・立体映像による瞬目回数の変化は、時間の経過と視差の度合いにより、影響を受ける可能性がある。

結果から、時間と伴う視差角の変化が、眼精疲労や立体感の変化を与えることを確認し、それらの有無による眼精疲労、立体感への影響を検討することができた。立体映像による眼精疲労の度合いは、視差角の絶対値の影響が大きく、同時に時系列的な変化量も影響を及ぼし得ることが分かった。一方、今回の実験はディスプレイサイズと視距離を固定して実験を行っており、それらの変化が生体に与える影響に関してはさらに検討する必要がある。また、多様な視差情報を持つ映像を対象に、立体表示デバイスの動画表示特性が生体に与える影響についての検討も望ましい。

参考文献

1) 財団法人機械システム振興協会，財団法人デジタルコンテンツ協会：“次世代立体視コンテンツ制作環境の開発に関するフィージビリティスタディ報告書-要旨-”，pp. 7 (2009)
2) 鵜飼一彦：“ステレオ映像の及ぼす生態への影響-調節輻輳の刺激が矛盾すると何が起こるのか”，VISION，17(2)，pp. 113-122 (2005)
3) 比留間伸行，福田忠彦：“調節応答から見た両眼融合式立体画像の観視条件”，電子情報通信学会論文誌，73(12)，pp. 2047-2054 (1990)
4) 井上哲理，野呂影勇，岩崎常人，大頭仁：“視覚機能から見た立体映像の呈示条件”，テレビジョン学会誌，48(10)，pp. 1301-1305 (1994)
5) 3D コンソーシアム安全ガイドライン部会：“人に優しい 3D 普及のための 3DC 安全ガイドライン(2010 年 4 月 20 日改訂，国際ガイドライン ISOIWA 準拠)”，pp. 22 (2010)

6) 岸信介，山添崇，柴田隆史，河合隆史，井上哲理，坂口裕介，岡部和重，久野泰浩："2 眼式立体映像のコンテンツ評価システムの試作"，映像情報メディア学会誌，60(6)，pp. 934-942 (2006)

7) 江本正喜，矢野澄男："立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係"，映像情報メディア学会誌，56(3)，pp. 447-454 (2002)

8) 江本正喜，正岡顕一郎，山之上裕一，菅原正幸，野尻裕司："ステレオディスプレイ観視時の水平両眼視差と視覚疲労"，Vision，17(2)，pp. 101-112 (2005)

9) T. Iwasaki, T. Kubota, A. Tawara : "The tolerance range of binocular disparity on a 3D display based on the physiological characteristics of ocular accommodation", Displays, 30(1), pp. 44-48 (2009)

10) 泉武博監修, NHK 放送技術研究所編:"3 次元映像の基礎-3 章 3 次元画像システムの設計", pp. 53 (1995)

11) 岩崎常人："眼精疲労の測定方法と評価-CFF と AA-1"，眼科，51(4)，pp. 387-395 (2009)

12) 田多英興, 山田冨美雄, 福田恭介:"まばたきの心理学-1.まばたきの分類と役割", pp. 5 (1991)

13) 田多英興，山田冨美雄，福田恭介："まばたきの心理学-3.まばたきの評価法と速度"，pp. 45 (1991)

14) J. H. Skotte, J. K. Nøjgaard, L. V. Jørgensen, K. B. Christensen, G. Sjøgaard : "Eye blink frequency during different computer tasks quantified by electrooculography", European Journal of Applied Physiology, 99(2), pp. 113-119 (2007)

15) M. Helland, G. Horgen, T. M. Kvikstad, T. Garthus, J. Richard Bruenech, A. Aaras : "Musculoskeletal, visual and psychosocial stress in VDU operators after moving to an ergonomically designed office landscape", Applied Ergonomics, 39(3), pp. 284-295 (2008)

16) S. Kishi, S. Kim, T. Shibata, T. Kawai, J. Hakkinen, J. Takatalo, G. Nyman : "Scalable 3D image conversion and ergonomic evaluation", Proc. SPIE, 6803, pp. 68030F (2008)

17) Stereo fly test, Stereo Optical Co., Inc (2009)

18) S. Ishihara : "Ishihara's Tests for Color Deficiency (Concise Edition)", Kanehara Trading Inc. (2003)

19) W. E. MacLean, M. H. Lewis, W. A. Bryson-Brockmann, D. N. Ellis, R. E. Arendt, A. A. Baumeister : "Blink rate and stereotyped behavior : Evidence for dopamine involvement?", Biological Psychiatry, 20, pp. 1321-1325 (1985)

20) J. A. Stern, D. Boyer, D. Schroeder : "Blink Rate: A Possible Measure of Fatigue", Human Factors, 36(2), pp. 285-297 (1994)

21) R.R. Mourant, R. Lakshmanan, R. Chantadisai : "Visual Fatigue and Cathode Ray Tube Display Terminals", Human Factors, 23(5), pp. 529-540 (1981)

22) E. Lee, K. Park, M. Whang, K. Min : "Measuring the degree of eyestrain caused by watching LCD and PDP devices", International Journal of Industrial Ergonomics, 39(5), pp. 798-806 (2009)

第６章　結論

本研究では、表示デバイスの安全かつ快適な視聴環境の実現を目的として、心理・生理的評価を用い、表示デバイスの特徴が生体へ与える影響について、人間工学的評価を行った。研究手法として、心理および生理指標を用いることで、表示デバイスの時空間特性に起因するアーチファクトの発生条件を明らかにし、それらによる生体影響を調べた。さらに、これらの知見をもとに、表示デバイスの安全かつ快適な視聴にかかわる、システムの改善や、コンテンツの工夫など、眼精疲労の軽減手法について検討を行った。

第 1 章では、表示デバイスを安全かつ快適に利用するためには、より繊細で有効な評価指標と評価方法を確立していく必要があることを示し、本研究の背景と目的について述べた。第 2 章では、色順次表示方式に起因するアーチファクトを対象に、心理指標を用いて評価実験を行った。また、第 3 章では、色順次表示デバイスの種類を増やし、眼球運動の測定や精神的ストレスの変化の測定を行った。得られた知見を、以下にまとめる。

・色順次表示方式に起因する、CBU は、コントラスト比が大きく、サッケードを頻繁に行う刺激を呈示する場合、短時間の視聴でも、眼精疲労の自覚症状に影響を与える要因となる。

・CBU の観察における、眼精疲労の自覚症状は、持続時間が短く、一定の休憩により、回復される。

・映像刺激が RGB を基本とするカラー情報を持つことで、カラー情報の分離現象である CBU が見えにくくなる可能性がある。

・眼球運動の測定から、色順次表示方式に起因する、CBU は、サッケードを誘発する刺激に対し、停留時間や回数を増加させる可能性がある。

・CBU は、認識の有無にかかわらず、眼精疲労や精神的ストレスに影響を与え得る。また、被験者によっては、CBU を認識することにより、その影響を受けやすくなる。

本研究では、色順次表示方式に起因する CBU が、眼精疲労の自覚症状や、眼球運動や精神的ストレスを含めた、生体に与える影響が示された。色順次表示方式によるプロジェクターを安全かつ快適に利用するには、表示するコンテンツや使用環境を考慮するとともに、ハードウェア技術による CBU の解決が重要である。一方、システムや、コンテンツを工夫することにより、CBU からの生体影響を軽減する可能性が表れた。色順次表示方式では、カラーホイールの回転によって色再現を行う。本研究では、回転速度（周波数）が高くなるにつれ、観察による眼精疲労や精神的ストレスの度合いが低くなる結果が表れた。また、コンテンツのコントラスト比を調節するなど、CBU の発生しにくいデザインにすることで、観察者に与える影響を軽減できる可能性がある。表示方式に起因するアーチファクトの影響は、情報が少なく、いまだ明らかになっていない部分が多い。このような知見を広げることで、表示デバイスの製造段階において、より安全なデザインの設計が可能となる。また、消費者においても、CBU のような、表示方式に起因するアーチファクトの発生条件や、生体影響が認識されることにより、より快適な操作環境をつくろうという流れができると予測される。

第 4 章と第 5 章では、立体表示デバイスを対象に、表示方式の特性や、時間経過とともに変化する視差情報が、生体に与える影響を調べた。第 4 章は、表示方式の特性に起因するアーチファクトの発生条件を明確にし、映像酔いや視覚負担および立体感への変化を調べることで、生体への影響を調べた。第 5 章では、第 4 章の知見をもとに、立体表示デバイスにおける、時間と伴う視差角の変化が、眼精疲労や立体感の変化に与える生体影響について、実験的な検討を行った。その結果、時間とともに変化する視差角により、視覚負担および立体感の変化に関する基礎的な知見を得た。得られた知見を、以下にまとめる。

・時間または空間多重化による表示方法は、表示効率とのトレードオフとして表示方式の時空間特性によるアーチファクトが知覚され、映像酔いや視覚負担および立体感に影響を与える。

・時間または空間多重化による表示方法は、刺激の呈示環境により、本来表示されない視差情報が知覚され、映像酔いや視覚負担および立体感に影響を与える。

・時間多重方式において、サッケードの際に知覚されるファントムアレイが、眼精疲労および立体感を上昇させる要因となる。

・空間多重方式において、左右眼で異なった視標を認知することで生じる視野闘争が、眼精疲労および立体感を上昇させる要因となる。

・立体映像と 2D 映像の疲労感は、同じ視差を持続する場合、一定の眼精疲労が生じるが、一定の時間経過とともに疲労感の差異が顕著となり、立体映像の方が大きく上昇した。

・立体映像の視差角を一定に維持した後、交差方向に変化すると立体感が大きくなり、眼精疲労の度合いが増加する。また、2D 映像に変化すると立体感がなくなり、眼精疲労の度合いが低くなる。

・立体映像による眼精疲労の度合いは、交差方向（浮き方向）および同側方向（沈み方向）といった呈示位置により、視差角の絶対値に影響を受けた。

・立体映像による瞬目回数の変化は、時間の経過と視差の度合いにより、疲労感が上昇すると増加した。

本研究では、方式ごとに異なるアーチファクトを確認し、それらの有無による眼精疲労や、立体感への影響に関する知見を得た。アーチファクトより、眼精疲労の上昇など、生体へのネガティブな影響が懸念される一方、各表示方式のシステムを理解し、アーチファクトの発生要因を把握することで、軽減することができる。たとえば、時間多重方式では、水平移動するコンテンツに対し、左右映像の呈示時間差により生じる視差の分、左右映像に視差を与えることによって、偽視差の除去が可能となる。また、空間多重方式では、インタレース型の表示により、偽視差が発生されることから、左右映像をプログレッシブ型で表示することに除去される。また、時間多重方式における、CFF 以上の周波数から発生するフリッカと、空間多重方式における、解像度の低下は、眼精疲労の自覚症状に影響が少ないことが分かった。

時間経過と視差角の変化に関しては、観察者の眼精疲労や立体感の変化を与えることを確認し、それらの有無による生体影響を検討することができた。ディスプレイサイズと視距離を固定した今回の条件では、立体映像による眼精疲労の度合いは、視差角の絶対値の影響が大きく、同時に時系列的な変化量も影響を及ぼし得ることが分かった。立体表示デバイスにコンテンツを表示させる際に、時間経過に合わせて視差を調整することにより、長時間でも安全かつ快適な立体視が可能となる。また、立体表示デバイスを使用する際、一定時間が経過するにつれ、視差をなくし、2D 映像に戻すことで、立体映像による眼精疲労を軽減することができる。今後は、多様な視差情報を持つ映像を対象に、客観的な評価指標などを導入し、引き続き検討を行っていきたい。

本研究では、視角情報を表示するデバイスにおいて、表示方式に起因するアーチファクトの発生条件を明確にし、生体への影響に重点をおいて、人間工学的視点からの評価実験を行った。主観評価により眼精疲労や立体感の程度を定量化し、眼球運動や精神的ストレス指標といった客観評価を組み合わせることで、アーチファクトの生体影響が明らかになった。また、表示デバイスの特性を理解し、コンテンツの制作やシステムの改善に応用することで、安全かつ快適な視覚情報の提示が可能となることが示された。今回の研究は、人にやさしいシステム開発や表示デバイスを考慮したコンテンツ制作に、有益な知見として貢献するものと考えられる。また、技術の進化により生じるアーチファクトや不快感を与え得るさまざまな視聴環境は、人間工学的評価により生体影響の生理データを収集することが可能となる。そのデータによる研究成果を、システム開発およびコンテンツ制作にフィードバックすることに、改善が可能となる。今後、さらに知見を広げ、表示デバイスの生体影響において、誰でも簡単に測定可能となる、有効的な評価方法を確立し、安全かつ快適な表示デバイスの視聴環境作りを目指す必要がある。

謝辞

本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始、ご指導をいただきました、早稲田大学大学院国際情報通信研究科の河合隆史教授に心から感謝の意を表します。

本論文作成にあたり、貴重なご意見とご指導をいただきました東京工芸大学の畑田豊彦名誉教授に感謝いたします。また、本論文の細部にわたり貴重なご指導とご助言をいただきました、早稲田大学大学院国際情報通信研究科の亀山歩教授、坂井滋和教授に感謝いたします。

研究の始めから、多大なお力添えをいただき、早稲田大学理工学術院の故鵜飼一彦教授に深く感謝するとともに、ご冥福をお祈りいたします。人間工学の見地から研究に関するご指導をいただきました、日本学術振興会特別研究員柴田隆史博士に感謝いたします。研究を進めるに当たって、ご指導いただきました早稲田大学理工学術院の山田宰客員教授に感謝いたします。

英語の指導、研究の進め方でご指導いただきました、早稲田大学国際情報通信研究センターの三家礼子博士、徳山大学豊沢聡教授に感謝いたします。同じく、研究の進め方でご指導いただきました、早稲田大学理工学術院助教盛川浩志博士に感謝の意を表します。

色順次表示方式に関わる研究でお世話になりました、セイコーエプソン株式会社の橋爪俊明様、伊藤治郎様に感謝いたします。立体表示方式に関わる研究でお世話になりました、株式会社アスナの河野道之様、株式会社ヨコシネディーアイエーの村山捷昭様、アストロデザイン株式会社井口昭彦様に感謝いたします。

様々な形でご協力・時にはご指導いただきました研究室の皆様に感謝いたします。また、被験者を務めていただきました、皆様に感謝の意を表します。

そして、温かい声援をいただきました、ロータリー米山記念奨学会の皆様、本庄南ロータリークラブの皆様に感謝いたします。

最後に、これまでの研究生活を支えていただいた家族に感謝いたします。

研究業績

著書

1．坂根厳夫，苗村健，畑田豊彦，佐藤隆夫，他共著：立体視テクノロジー-次世代立体表示技術の最前線，エヌ・ティー・エス，第 5 編 立体映像・画像を取り巻く国際状況，第 3 章 韓国における最新関連動向，pp. 695-701 (2008)

学会論文

1．金相賢，柴田隆史，河合隆史，鵜飼一彦：カラーシーケンシャル表示方式プロジェクタにおけるカラーブレイクアップの視覚的特性，映像情報メディア学会誌，Vol. 61，No. 12，pp. 1742-1749 (2007)

2．Takashi Kawai, Shinsuke Kishi, Sanghyun Kim, Takashi Yamazoe, Takashi Shibata, Tetsuri Inoue, Yusuke Sakaguchi, Kazushige Okabe, Kuno Yasuhiro：Ergonomic approaches to content creation for 3D displays, Journal of Information Display, Vol. 8, No. 1, pp. 26-31 (2007)

3．Sanghyun Kim, Takashi Shibata, Takashi Kawai, Kazuhiko Ukai：Ergonomic evaluation of a field-sequential colour projection system, Displays, Vol. 29, pp. 132-137 (2008)

4．柴田隆史，河合隆史，李在麟，金相賢，大槻正樹，三宅信行，葭原義弘，岩崎常人：光学補正を用いた立体映像による眼精疲労の回復効果，日本人間工学会誌，Vol. 44，No. 6，pp. 341-348 (2008)

5．Sanghyun Kim, Shinsuke Kishi, Takashi Kawai, Toyohiko Hatada：Time series evaluation of visual fatigue and depth sensation using a stereoscopic display, Journal of Information Display, Vol. 10, No. 4, pp. 62-68 (2009)

6．岸信介，金相賢，柴田隆史，河合隆史，Jukka Häkkinen，Jari Takatalo，Göte Nyman：安全性と快適性を意図した二眼式立体映像のスケーラブル変換，映像情報メディア学会誌，Vol．64，No．12，pp．1912 -1920（2010）

国際会議

1．Takashi Shibata, Takashi Kawai, Sanghyun Kim, Kazuhiko Ukai : Ergonomic evaluation of color breakup in field-sequential color projection system, Proceedings of the 5th IMID, pp. 121-124 (2005)

2．Sanghyun Kim, Takashi Shibata, Takashi Kawai, Kazuhiko Ukai : Physiological effects of color breakup in field-sequential color projection system, SID Symposium Digest, Vol. 37, pp. 311-314 (2006)

3．Shinsuke Kishi, Sanghyun Kim, Takashi Shibata, Takashi Kawai, Jukka Häkkinen, Jari Takatalo, Göte Nyman : Scalable 3D image conversion and ergonomic evaluation, Proceedings of the SPIE, Vol. 6803, pp. 68030F-1-9 (2008)

4．Sanghyun Kim, Shinsuke Kishi , Takashi Kawai, Toyohiko Hatada : Time-series changes of visual fatigue and depth sensation in viewing stereoscopic images, Proceedings of IMID, pp. 1099-1102 (2009)

5．Sanghyun Kim, Junki Yoshitake, Takashi Kawai, Osamu Yamada, Akihiko Iguchi : Ergonomic evaluation of visual artifacts in stereoscopic display devices, Proceedings of IMID, pp. 154-155 (2010)

6．Sanghyun Kim, Junki Yoshitake, Hiroyuki Morikawa, Takashi Kawai, Osamu Yamada, Akihiko Iguchi : Psycho-physiological effects of visual artifacts by stereoscopic display systems, Proceedings of the SPIE (2011) (掲載決定)

学会発表

1．柴田隆史，金相賢，河合隆史，鵜飼一彦：精神的ストレスを指標としたカラーシーケンシャル表示方式の評価（1），日本人間工学会第 46 回大会講演集，Vol．41，特別号，pp．190-191 (2005)

2．金相賢，柴田隆史，河合隆史，鵜飼一彦：精神的ストレスを指標としたカラーシーケンシャル表示方式の評価（2），日本人間工学会第 46 回大会講演集，Vol．41，特別号，pp．192-193 (2005)

3．柴田隆史，李在麟，金相賢，河合隆史，大槻正樹，三宅信行，葭原義弘，岩崎常人：光学補正方式を用いた立体ディスプレイによる眼精疲労の回復効果，日本人間工学会関東支部第 36 回大会講演集，pp．167-168 (2006)

4．岸信介，金相賢，柴田隆史，河合隆史：立体映像コンテンツのスケーラブル変換手法の開発，日本人間工学会第 48 回大会，Vol．43，特別号，pp．418-419 (2007)

5．金相賢，岸信介，河合隆史，畑田豊彦：立体映像による視覚負担の時系列評価への試み，日本人間工学会第 50 回大会講演集，Vol．45，特別号，pp．172-173 (2009)

6．金相賢，吉竹淳樹，河合隆史，山田宰，井口昭彦，村山捷昭：立体呈示方式における視覚特性に関する基礎的検討（1），日本人間工学会第 51 回大会講演集，Vol．46，特別号，pp．470-471 (2010)

7．吉竹淳樹，金相賢，河合隆史，山田宰，井口昭彦，村山捷昭：立体呈示方式における視覚特性に関する基礎的検討（2），日本人間工学会第 51 回大会講演集，Vol．46，特別号，pp．472-473 (2010)

8．吉竹淳樹，金相賢，盛川浩志，河合隆史，山田宰，井口昭彦：立体ディスプレイ方式のアーチファクトによる生体影響評価，日本人間工学会関東支部第 40 回大会講演集，

pp. 160-161 (2010)

9. 平原正広，金相賢，盛川浩志，河合隆史，三浦隆文，小櫃敏郎：PC を用いた立体視コンテンツ視聴による生体影響評価，日本人間工学会関東支部第 40 回大会講演集，pp. 164-165 (2010)